



**DADOS DE ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA NA  
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI**

Porto Alegre, 2012

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

## INSTITUTO DE GEOCÊNCIAS

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Sbaraini, Samuel

Dados de anisotropia de susceptibilidade magnética na modelagem tridimensional do maciço sienítico Piquiri. / Samuel Sbaraini. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2012.

[65 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2012.

Orientador: Maria de Fátima Bitencourt

1. Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. 2. Maciço Sienítico Piquiri. 3. Geologia estrutural. 4. Magmatismo pós-colisional. 5. Ciclo brasileiro I. Título.

---

Catlogação na Publicação  
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS  
Alexandre Ribas Semeler CRB 10/1900

**SAMUEL SBARAINI**

**DADOS DE ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA NA  
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria de Fátima A. S. Bitencourt

**Co-orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Irene Bartolomeu Raposo

Porto Alegre, 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**DADOS DE ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA NA MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI**", elaborado por "Samuel Sbaraini", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Prof. Dr. Antonio Flavio Uberti Costa

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo Pinto Gastal

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais Airton Pedro Sbaraini e Maria Dametto pelo apoio incondicional e por me darem a oportunidade de estudar essa ciência tão fodástica que é a Geologia, amo vocês!

Agradeço ao meu amigo Samuel Grass Brandão pelo incentivo a entrar nessa brincadeira.

Agradeço aos meus amigos da Alberto Bins 781, Eliselmo, Nuno, Godonho, Rafa, Nata, Carlinhos, pelos seis anos de churrascadas, cervejadas que jamais serão esquecidas.

Agradeço a toda família Cartel da Cevada (e é grande!) por esses seis anos de amizade e rock 'n' roll, e ao grande Sergião Immich por me apresentar toda essa gente boa.

Agradeço a minha segunda casa nesses sete anos, o Centro Acadêmico dos Estudantes de Geologia, mais conhecido como CAEG e a TODA gurizada que mantém isso vivo!

Agradeço a minha orientadora Maria de Fátima Bitencourt e todos os colegas do grupo de pesquisa Magmatismo Sintectônico.

Agradeço a Maria Irene Raposo, pela supervisão no meu trabalho de conclusão e pela confiança em deixar o laboratório sob minha responsabilidade.

Um salve a todos os grandes amigos feitos nesses últimos anos, são tantos que é melhor não citar nomes para não esquecer de ninguém, mas um salve especial aos colegas Giuseppe Betino De Toni e Gustavo Zvirtes pelo companheirismo de sempre, e aos mestres Luana M. Florisbal, Tiago R. Gregory e Felipe Guadagnin pelo grande exemplo.

E agradeço a todos que torceram pra que isso se cristalizasse.

*“El conocimiento nos hace responsables”*

Ernesto “Che” Guevara

## RESUMO

Este trabalho visa à obtenção de dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) e à caracterização da trama estrutural magnética do Maciço Sienítico Piquiri (MSP) uma intrusão de ca. 611 Ma do Escudo Sul-rio-grandense. A obtenção de dados de ASM envolveu a realização de perfis de amostragem sistemática uniformemente espaçados no corpo. Utilizando uma perfuratriz portátil com serra diamantada, foram realizadas perfurações em 46 pontos previamente estabelecidos, segundo uma malha tão regular quanto possível, sendo retiradas amostras cilíndricas orientadas das diferentes fácies do Maciço. As medidas magnéticas foram feitas usando um susceptímetro KAPPABRIDGE KLY-4S e os produtos obtidos são os valores das susceptibilidades magnéticas principais, representados por  $K_{max}$ ,  $K_{int}$  e  $K_{min}$ , sendo os eixos de maior, intermediária e mínima susceptibilidade magnética, respectivamente. A estes eixos são atribuídos valores escalares e direcionais (declinação/inclinação). Utilizando-se os novos dados obtidos nos trabalhos de campo e os dados de ASM obtidos, efetuou-se neste trabalho uma atualização do mapa geológico pré-existente do Maciço, bem como a caracterização magnética de cada fácies reconhecida e delimitada no mesmo. A *fácies de borda* apresenta valores de susceptibilidade magnética ( $k$ ), grau de anisotropia ( $P'$ ) e parâmetro de forma ( $T$ ) muito variados, com lineações magnéticas com altos ângulos de caimento; a *fácies principal* também apresenta valores de  $k$  e  $P'$  variados, porém, tende a apresentar parâmetro de forma oblato. As lineações apresentam ângulos de caimento moderados a baixos. A *fácies quartzo sienítica* possui uma menor variação dos valores de  $k$  e  $P'$  e apresenta parâmetro de forma neutro a levemente prolato. Seu padrão de lineações subhorizontais é também o mais regular entre as fácies. A *fácies granítica* é a que apresenta a menor variação nos valores de  $k$  e  $P'$  variando o parâmetro de forma de levemente prolato a oblato. As lineações são similares às da fácies principal do Maciço. Na maior parte dos casos, as foliações magnéticas são concordantes com as foliações magmáticas em todas as fácies, com pequenas variações. A geometria das lineações magnéticas deixa claro que as fácies do MSP se comportam de dois modos distintos. Os termos de borda têm lineações subverticais enquanto nos termos mais centrais as lineações são subhorizontais, indicando diferentes geometrias para o fluxo. Considerando os dados de campo que evidenciam a relação intrusiva da fácies principal na de borda, e termos quartzo sieníticos intrusivos na fácies principal, a ideia de que o MSP tenha sido gerado em apenas um pulso magmático, com a faciologia resultando apenas da diferenciação magmática *in situ*, não é corroborada. A hipótese de que as fácies do Maciço tenham sido geradas através de diferentes pulsos magmáticos é mais compatível com os dados de ASM e estruturais apresentados neste trabalho.

**Palavras-Chave:** Anisotropia de Susceptibilidade Magnética, Maciço Sienítico Piquiri, geologia estrutural, trama magnética, magmatismo pós-colisional.

## ABSTRACT

This paper aims at obtaining Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) data in order to characterize the magnetic fabric of the Piquiri Syenite Massif (MSP), an intrusive body of ca. 611 Ma in the Sul-rio-grandense Shield. Systematic AMS sampling was done along uniformly spaced sections long the intrusion. A diamond-saw portable rock drill system was used to perform drilling in 46 previously established sampling sites according to a regular network, and representative oriented cylindrical samples were taken from each of the rock varieties found within the different facies of the Massif. Magnetic measurements were carried out using a KAPPABRIDGE KLY-4S susceptibilimeter and results are the principal magnetic susceptibilities represented by  $K_{max}$ ,  $K_{int}$  and  $K_{min}$ , as maximum, intermediate and minimum magnetic susceptibility values, respectively. Scalar and directional (declination / inclination) values are attributed to these axes. An updating of the pre-existing geological map of the MSP was made by integrating new field data and ASM results obtained in this work, as well as the magnetic characterization of each facies recognized and characterized within the Massif. The *marginal facies* rocks show highly variable magnetic susceptibility ( $k$ ), anisotropy degree ( $P'$ ) and shape parameter ( $T$ ), with highly plunging magnetic lineations; the *main facies* has also variable values of  $k$  and  $P'$ , but its shape parameter points to an oblate ellipsoid. Magnetic lineations plunge at moderate to low angles. The *quartz-syenitic facies* has less variable  $k$  and  $P'$  values, and its shape parameter is either neutral or slightly prolate. Its subhorizontal lineation pattern is also the most regular among the facies. The *granitic facies* shows the least variable values of  $k$  and  $P'$ , and shape parameter oscillating from slightly prolate to oblate. The lineations are similar to the ones found in the main facies of the massif. With minor exceptions, igneous and magnetic foliations throughout the pluton are concordant. The geometrical behaviour of magnetic lineations indicate that the varieties of the MSP behave in two distinct ways. Rocks from the intrusion margins have subvertical lineations, while in the central varieties they are sub-horizontal, thus indicating two distinct flow geometries. Considering field data which indicate intrusive relations of the main facies in the marginal one, and of the quartz-syenites in the main facies varieties, the concept of in situ differentiation of a single intrusion is not corroborated. The generation of the MSP by the intrusion of successive magmatic pulses is more consistent with the structural and magnetic data presented in this paper.

**Keywords:** Anisotropy of Magnetic Susceptibility, Piquiri Syenitic Massif, structural geology; magnetic fabrics, post-collisional magmatism.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1) Localização da área de estudo e principais vias de acesso. ....	3
Figura 2) Direções das componentes de um vetor. ....	5
Figura 3) Dipolo Geocêntrico Axial. ....	6
Figura 4) Momento Magnético. ....	7
Figura 5) Comportamento magnético dos minerais. ....	10
Figura 6) Magnetização vs. Tempo. ....	13
Figura 7) $\log_{10}\tau$ (s) x Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). ....	13
Figura 8) (A) Cilindros que não quebraram com a perfuração; (B) Cilindros que quebraram com a perfuração, mas serão facilmente recolocados na posição correta devido a marcações previamente feitas. ....	21
Figura 9) Orientador dos testemunhos cilíndricos: (A) Haste de alumínio com ranhura na base; (B) Bússola tipo Brunton acoplada; (C) Transferidor de $360^{\circ}$ e haste de metal, para leitura do azimute solar; (D) Transferidor de $90^{\circ}$ para medir a inclinação do furo. ....	22
Figura 10) (A) Marcação sendo feita diretamente no cilindro; (B) Marcação sendo feita de modo indireto, caso o cilindro quebre; (C) Cilindro orientado e identificado; (D) Cilindro que se fragmentou durante o processo de perfuração, necessita ser remontado e colado. ....	23
Figura 11) Serra utilizada para o fatiamento dos cilindros. ....	23
Figura 12) Leituras realizadas em cada espécime. ....	25
Figura 13) Representação estereográfica dos dados direcionais de ASM. ....	26
Figura 14) Escudos Sul-rio-grandense e Uruguaio (Modificado de Bitencourt 2011)...	28
Figura 15) Contexto regional do Maciço Sienítico Piquiri (Modificado de Bitencourt 2011). ....	29
Figura 16) Mapa geológico do Maciço Sienítico Piquiri e localização dos pontos amostrados. ....	33
Figura 17) Croqui esquemático dos sítios PQ-094 / PQ-095 com os respectivos estereogramas magneto-estruturais e gráfico do Grau da anisotropia vs. Parâmetro de forma de todos espécimes dos sítios. ....	35
Figura 18) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. Gráfico da Susceptibilidade magnética vs. Grau de anisotropia das rochas do Maciço Sienítico Piquiri. ....	38

Figura 19) Furos realizados na fácies principal do Maciço com concentração de máficos padrão (sítio PQ-006). .....	39
Figura 20) Furos realizados na fácies principal do Maciço com concentração anômala de máficos (sítio PQ-006). .....	40
Figura 21) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - gráfico da susceptibilidade vs. grau de anisotropia dos sítios PQ-006 e PQ-007.....	40
Figura 22) Furos realizados em injeção de material quartzo sienítico na fácies principal.....	41
Figura 23) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética dos Sítios PQ-006 (fácies principal), PQ-007a (fácies principal com concentrado de máficos), PQ-007b (injeção quartzo sienítica) e PQ-010 (fácies quartzo sienítica). Gráfico da susceptibilidade magnética vs. parâmetro de forma. ....	42
Figura 24) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - gráfico do grau de anisotropia vs. parâmetro de forma.....	43
Figura 25) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - gráfico do grau de anisotropia vs. parâmetro de forma dos sítios PQ-092 e PQ-093.....	44
Figura 26) Representação gráfica da trama planar e da trama linear de ASM.....	45
Figura 27) Comparação entre as foliações magmática e magnética do Maciço Sienítico Piquiri. ....	47

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ASM – Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

CVC – Complexo Metamórfico Várzea do Capivarita

Fig - Figura

Kf – K-feldspato

L – Estrutura linear

MSP – Maciço Sienítico Piquiri

qz – quartzo

S – Estrutura planar

SI – Sistema Internacional de Unidades

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b>	
INTRODUÇÃO .....	1
<b>CAPÍTULO II</b>	
ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA – REVISÃO CONCEITUAL	
2.1 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.....	4
2.2 PRINCIPAIS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS.....	7
2.3 COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DOS MINERAIS .....	8
2.4 MAGNETIZAÇÃO NAS ROCHAS.....	10
2.5 ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA.....	14
2.6 ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA E A RELAÇÃO COM A TRAMA DA ROCHAS .....	17
<b>CAPÍTULO III</b>	
TÉCNICAS E MÉTODOS	
3.1 INTEGRAÇÃO DE DADOS .....	19
3.2 AMOSTRAGEM.....	20
3.4 LEITURA DAS MEDIDAS MAGNÉTICAS.....	24
3.5 REPRESENTAÇÃO DOS DADOS .....	25
<b>CAPÍTULO IV</b>	
CONTEXTO GEOLÓGICO	
4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	27
4.2 GEOLOGIA DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI .....	29
<b>CAPÍTULO V</b>	
RESULTADOS E DISCUSSÕES	
5.1 ATUALIZAÇÃO DO MAPA .....	32
5.2 AMOSTRAGEM.....	36
5.3 DADOS DE ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ESCALARES E DIRECIONAIS) .....	36
<b>CAPÍTULO VI</b>	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51
<b>Anexo I – Tabela de dados de ASM do Maciço Sienítico Piquiri.</b> .....	53

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Situado no Batólito Pelotas, porção leste do Escudo Sul-riograndense, o Maciço Sienítico Piquiri (MSP) é uma intrusão que representa o magmatismo final do Ciclo Brasileiro e é uma importante ocorrência de rocha ornamental no sul do Brasil.

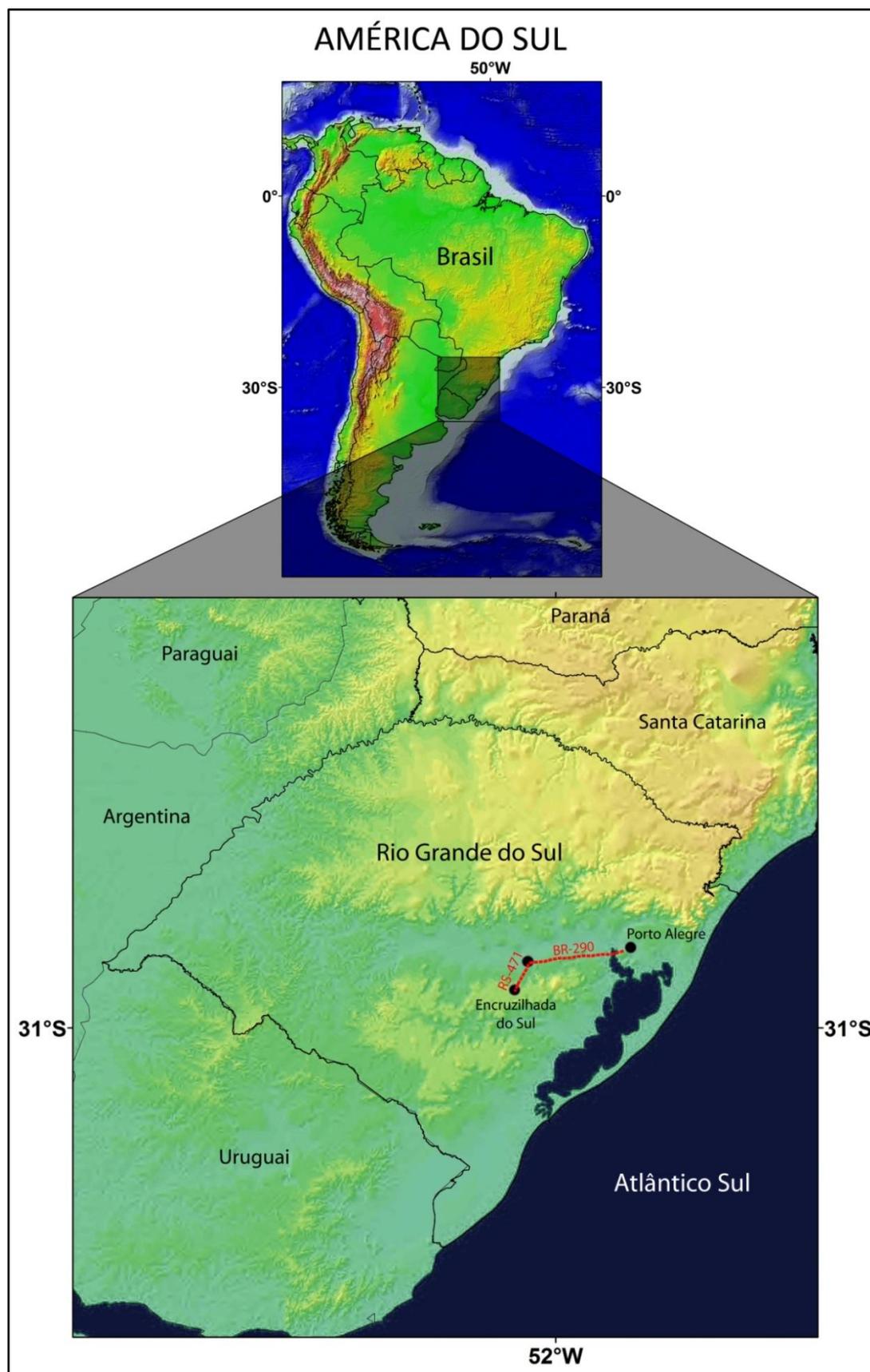
Com área de aproximadamente 140 km<sup>2</sup> e forma praticamente circular, as rochas do MSP variam de feldspato-alcálico sienitos a termos mais diferenciados, como quartzo sienitos e sienogranitos, no centro do corpo. Possuem cor avermelhada, têm textura equigranular variando de fina a grossa, localmente porfírica e geralmente possuem foliação bem marcada por cristais de Kf. É interpretado como resultado de mistura de magmas, fracionamento, fluxo viscoso e assimilação das encaixantes, o que é evidenciado pela grande quantidade de enclaves máficos microgranulares, *schlieren*, camadas máficas cumuláticas, autólitos de granulação fina e, principalmente, uma trama planar fortemente orientada (Jost *et al.*, 1985; Vieira *et al.*, 1989; Stabel, 2000).

Desde a primeira descrição apresentada por Picada (1963), diversos estudos focados em diferentes aspectos foram realizados, desde a caracterização petrológica, faciológica e geoquímica do Maciço, até sua relação com as encaixantes. Porém, embora tenha uma trama estrutural planar bem caracterizada, nunca se chegou a um consenso sobre a caracterização da trama estrutural linear do MSP.

A técnica da Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) permite um estudo sistemático de um maciço granítico (no caso, sienítico) fornecendo dados direcionais (foliação e lineação magnética) que podem ser relacionados com a foliação e a lineação magmática. Além disso, obtêm-se também dados escalares (parâmetros quantitativos) que estão relacionados com a composição química das rochas e com a taxa de deformação que sofreram.

O projeto tem como objetivo a obtenção de dados de ASM em toda a extensão do Maciço, buscando estabelecer o elipsóide magnético local para comparação com dados de trama planar e linear previamente obtidos em trabalhos de geologia estrutural de campo, com isso, contribuir para uma futura modelagem tridimensional do Maciço, para entender melhor sua cinemática e mecanismos de posicionamento. Além disso, com a caracterização magnética de cada fácies do Maciço, será possível o aprimoramento do mapa pré-existente.

A área de estudo localiza-se na porção central do estado do Rio Grande do Sul, na região do município de Encruzilhada do Sul, a aproximadamente 170 km de Porto Alegre (Fig. 1). Abrange a porção leste da folha Capané (SH.22.Y.A.III.3) e a porção oeste da folha Passo das Canas (SH.22.Y.A.III.4). O acesso principal ao município de Encruzilhada do Sul se dá, partindo de Porto Alegre, pela BR-290 até o município de Pântano Grande, entrando na RS-471 rumo sul, até Encruzilhada do Sul. Os acessos à área de estudo são através de estradas secundárias intermunicipais, sendo a estrada do Chanã a mais conhecida, que leva à parte sudeste do Maciço Sienítico Piquiri.



## CAPÍTULO II

### ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA – REVISÃO CONCEITUAL

Anisotropia de susceptibilidade magnética foi reconhecida como uma característica dos minerais em 1899 e a compatibilidade da trama estrutural das rochas com suas respectivas tramas de ASM foi relatada entre 1942 e 1958. Um pouco depois, foliação e lineação mineral foram associadas com os principais eixos do elipsoide de ASM.

A técnica de ASM, assim como seu estudo complementar tem tido um acentuado desenvolvimento no que diz respeito à instrumentação, como no que diz respeito à metodologia (Tarling & Hrouda, 1993; Borradaile & Henry, 1997) permitindo que, num curto intervalo de tempo se obtenham boas respostas sobre o estudo das direções e da geometria da deformação.

Para entender a ASM é preciso fazer uma revisão dos principais conceitos sobre magnetismo e propriedades magnéticas.

#### 2.1 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Em paleomagnetismo, as direções das componentes de um vetor representado na superfície do campo geomagnético são apresentadas em termos de ângulos como mostrado na figura 2. A componente vertical  $H_v$ , do campo geomagnético superficial,  $H$ , que é definida negativa para baixo e dada por :

$$H_v = H \cdot \text{sen } I$$

onde  $H$  é o módulo de  $\mathbf{H}$  e  $I$  é o ângulo que  $\mathbf{H}$  faz com a horizontal, que varia de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$  e é definido como positivo para baixo. A componente horizontal,  $H_h$ , é dada por:

$$H_h = H \cdot \cos I$$

As componentes que apontam para o norte e o leste geográfico são, respectivamente:

$$H_N = H \cdot \cos I \cdot \cos D$$

$$H_E = H \cdot \cos I \cdot \sin D$$

onde  $D$  é a declinação, o ângulo formado entre o norte geográfico e a componente horizontal do campo, que varia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , positivo no sentido horário. Uma vez determinados  $I$  e  $D$ , as direções do campo são descritas completamente. Se forem conhecidas as componentes, o módulo do vetor campo é dado por:

$$H_E = \sqrt{H_N^2 + H_E^2 + H_V^2}$$

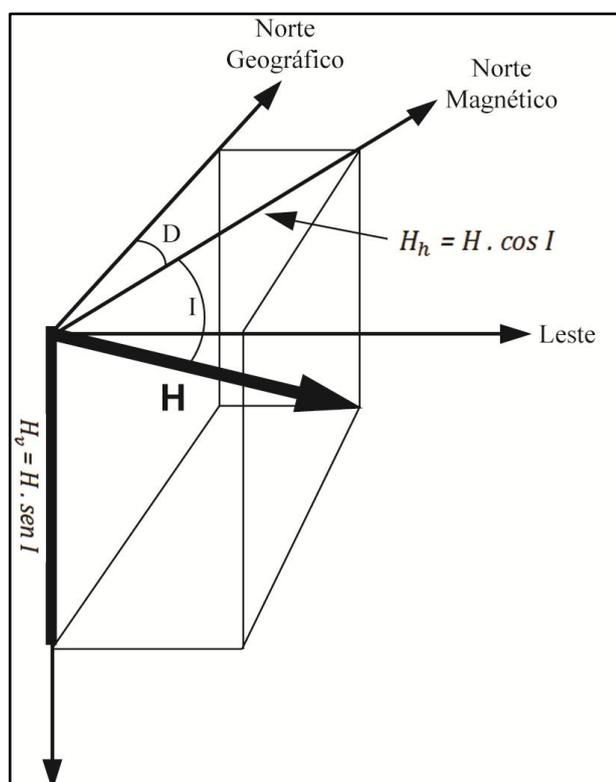


Figura 2) Direções das componentes de um vetor.

O campo magnético terrestre é predominantemente dipolar, como o de uma esfera uniformemente magnetizada (Fig. 3). A partir da expressão do potencial da esfera, que é equivalente ao potencial de um dipolo colocado em seu centro, é possível calcular as componentes vertical (v) e horizontal (h) do campo magnético num ponto P, na superfície da esfera:

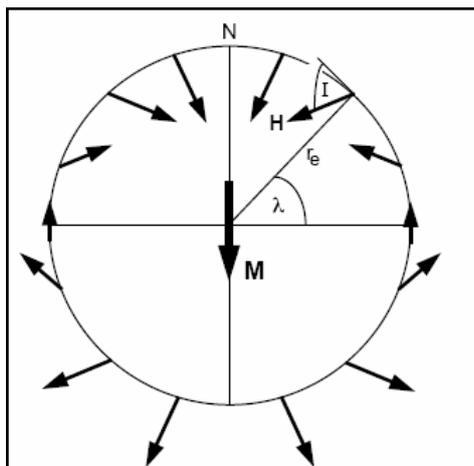


Figura 3) Dipolo Geocêntrico Axial.

$$H_h = \frac{M \cos \lambda}{r_e^3}$$

$$H_v = \frac{2 M \operatorname{sen} \lambda}{r_e^3}$$

$$H = \frac{M}{r_e^3} \sqrt{1 + 3 \operatorname{sen}^2 \lambda}$$

$$\operatorname{tg} I = \frac{H_v}{H_h} = \frac{2 \operatorname{sen} \lambda}{\cos \lambda} = 2 \operatorname{tg} \lambda$$

O magnetismo tem origem atômica e deve-se a três fatores:

- momento magnético dos núcleos: muito pequeno e, portanto, desprezível;
- elétrons orbitantes: momentos orbitais fazem a interligação dos momentos de spin e a estrutura cristalina;
- momento magnético de elétrons (momento de spins): explicam a maior parte das propriedades magnéticas de substâncias ferromagnéticas. O momento magnético de um elétron é  $9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$  e equivale a um "magneton de Bohr" ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{\pm |e| h}{2m_e}$$

onde,  $e$  = carga do elétron;  $h = 2\pi \hbar$  ( $\hbar$  é a constante de Planck) e  $m_e$  = massa do elétron.

## 2.2 PRINCIPAIS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

### 2.2.1 Momento magnético

O momento magnético  $M$  pode ser definido em termos de um par de cargas magnéticas ou por uma corrente elétrica percorrendo uma espiral (Fig. 4):

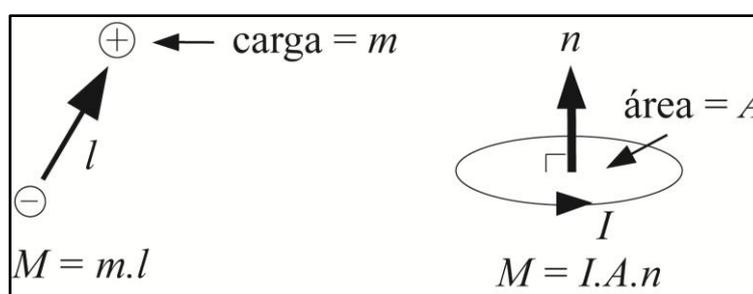


Figura 4) Momento Magnético.

### 2.2.2 Intensidade magnética

A intensidade magnética, ou magnetização,  $J$ , de um material é o valor do momento magnético por unidade de volume:

$$J = \frac{\sum_i M_i}{volume}$$

### 2.2.3 Susceptibilidade magnética

Designa-se por  $k$  a susceptibilidade por unidade de volume ( $\text{SI}/\text{cm}^3$ ) e por  $\chi$  a susceptibilidade por unidade de massa ( $\text{SI}/\text{g}$ ). Em geral a susceptibilidade  $k$  é diretamente proporcional à magnetização:

$$J = k.H$$

É o principal parâmetro magnético usado na interpretação geofísica. A susceptibilidade magnética das rochas comuns é de modo geral proporcional ao conteúdo de magnetita. Dos outros minerais magnéticos, apenas a pirrotita contribui significativamente para a susceptibilidade de certas rochas metamórficas e depósitos hidrotermais.

### 2.3 COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DOS MINERAIS

Nos minerais, há basicamente três tipos diferentes de comportamento magnético (Fig. 5):

- Diamagnetismo (a): é o comportamento dos minerais magneticamente neutros, que adquirem magnetização paralela mas com sentido inverso ao campo magnético indutor. A magnetização depende linearmente do campo aplicado e se reduz a zero quando o campo é removido. A susceptibilidade magnética é negativa e da ordem de  $10^{-6}$  (SI). Um exemplo de mineral diamagnético é o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ).

- Paramagnetismo (b): ocorre em minerais que possuem momentos magnéticos inerentes, devido a momentos de spin e momentos orbitais descompensados (camadas atômicas incompletas). Os paramagnéticos têm susceptibilidade positiva, mas é fraca (entre  $10^{-5}$  e  $10^{-3}$  (SI)). Um exemplo de mineral paramagnético é a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ).

- Ferromagnetismo (c): é o comportamento dos minerais que apresentam uma magnetização espontânea mesmo na ausência de um campo externo. Os momentos magnéticos devem-se a momentos de spin, mas não atuam independentemente. Os elétrons obedecem a certas regras da mecânica quântica que envolvem forças eletrostáticas (forças de troca) e que tendem a alinhar os momentos dos elétrons adjacentes paralelamente. Na natureza existem três elementos que são ferromagnéticos: ferro, cobalto e níquel. O comportamento magnético de uma amostra ferromagnética pode ser caracterizado por sua curva de histerese (Fig. 5c). Nota-se que quando o campo induzido  $H$  volta a zero, a amostra guarda uma magnetização residual chamada de magnetização remanescente ( $J_r$ ). A partir dessa

magnetização remanescente pode-se inferir a história magnética das rochas. Um exemplo de mineral ferromagnético é a magnetita. ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

O ferromagnetismo é uma propriedade que depende do arranjo tridimensional dos átomos na estrutura cristalina. Nos óxidos de ferro, a presença do oxigênio muda o sinal das forças de troca e os momentos adjacentes são anti-paralelos. Quando os momentos cancelam-se totalmente se trata de antiferromagnetismo e de ferrimagnetismo quando os momentos numa direção excedem os da direção oposta.

Paramagnetismo e diamagnetismo dependem somente da temperatura, ou seja, dependem do raio da órbita dos elétrons. Ferro, antiferro e ferrimagnetismo dependem das distâncias interatômicas. Com o aumento da temperatura, as distâncias podem ser excedidas e as interações (forças de troca) quebram. Chama-se Temperatura de Curie a temperatura acima da qual as forças de troca não podem atuar e o ordenamento magnético desaparece. Aplica-se às substâncias ferro e ferrimagnéticas. Analogamente define-se Temperatura de Néel para o caso das substâncias antiferromagnéticas.

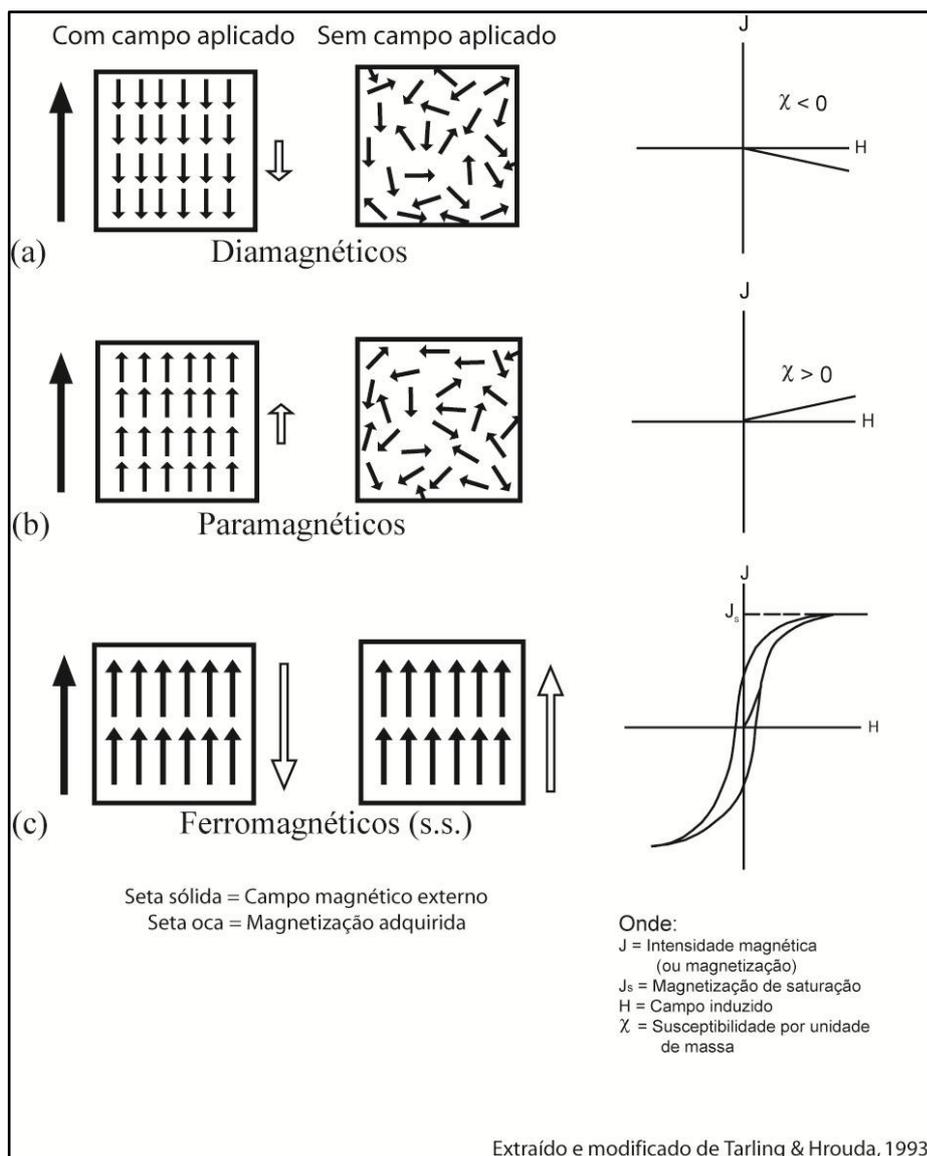


Figura 5) Comportamento magnético dos minerais.

## 2.4 MAGNETIZAÇÃO NAS ROCHAS

Nas rochas comuns a maior parte dos minerais são paramagnéticos ou diamagnéticos, com suscetibilidades positivas ou negativas da ordem de  $10^{-6}$  Gauss/Oe. As propriedades ferromagnéticas de uma rocha, entretanto, são impostas pelos seus minerais ferrimagnéticos, embora esses geralmente ocorram em baixa concentração (raramente excede 10% em volume). As propriedades ferromagnéticas da maioria dos tipos de rochas são devidas aos minerais do grupo de óxidos de Fe-Ti e, em menor escala, aos minerais do grupo de sulfetos de ferro.

Segundo Miranda (2011), baseado em estudos experimentais, se a rocha possuir mais de 0.1% de minerais ferromagnéticos, eles irão dominar a susceptibilidade magnética. Se isso não ocorrer, a susceptibilidade será dominada pelos minerais paramagnéticos, desde que presentes em volume superior a 1%. Se não houver pelo menos 0.1 % de ferromagnéticos nem 1% de paramagnéticos, a susceptibilidade magnética da rocha será dominada pelos minerais diamagnéticos.

A magnetização total  $J$  de uma rocha é o vetor soma da magnetização induzida  $J_i$  dependente de um campo magnético externo e da magnetização remanescente  $J_r$ :

$$J = J_i + J_r$$

#### 2.4.1 Magnetização Induzida

A magnetização induzida natural de uma rocha é a parte reversível de sua magnetização natural total, induzida pelo campo magnético terrestre à temperatura ambiente. O campo indutor  $H$  e a magnetização induzida  $M_i$  estão relacionadas pela susceptibilidade magnética:

$$M_i = \chi_{ij} \cdot H$$

Em geral, a susceptibilidade é um tensor de segunda ordem que depende do campo indutor ( $H$ ), da temperatura ( $T$ ), da pressão ou compressão, etc. Entretanto, para muitas aplicações práticas (quando se trata da magnetização induzida natural) a susceptibilidade das rochas comuns pode ser convenientemente considerada como uma constante isotrópica.

$$M_i = \chi_i \cdot H_t$$

onde  $H_i$  representa um campo magnético da ordem do campo magnético da Terra. A razão entre a magnetização remanescente natural (MRN) e a magnetização induzida natural é chamada de fator Q de Königsberger:

$$Q = M_r / M_i$$

O fator Q mede a contribuição relativa das duas componentes. Atinge valores da ordem de 100 em derrames basálticos, excede 1 em intrusivas máficas e varia entre 0 e 1 em intrusivas ácidas.

#### 2.4.2 Magnetização Remanescente

Em cristais com um único domínio (SD):

$$J_r = J_{ro} \exp(-t/\tau)$$

- $J_r$  é a magnetização remanescente
- $\tau$ , característico da relaxação em função do tempo:

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left[\frac{vH_c J_s}{2kT}\right] \quad (\text{Louis Néel})$$

- C: fator de frequência =  $10^8 \text{ s}^{-1}$
- v: volume dos grãos SD
- $H_c$ : coercividade dos grãos SD
- $J_s$ : magnetização de saturação
- $kT$ : energia térmica

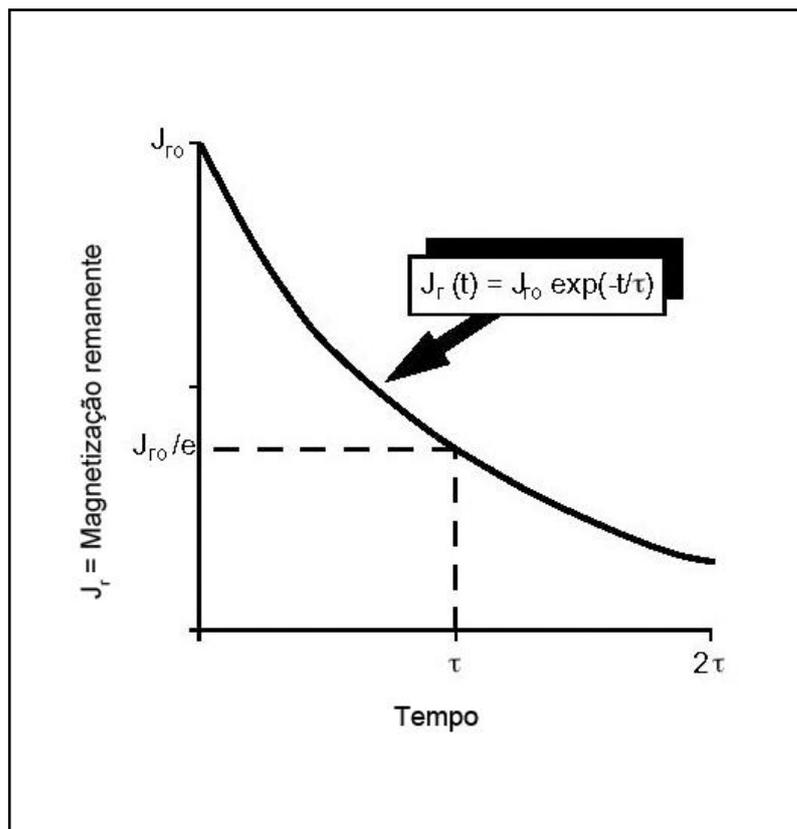


Figura 6) Magnetização vs. Tempo.

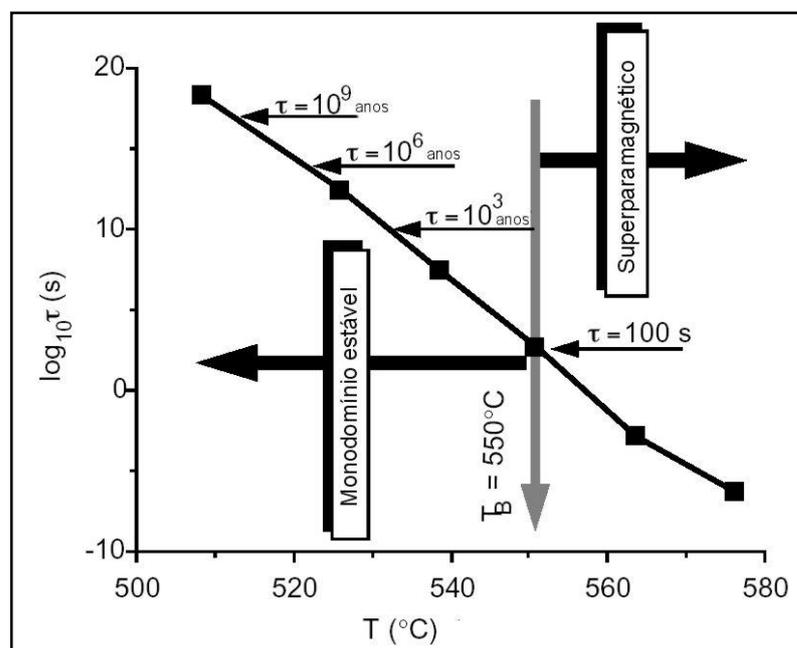


Figura 7)  $\log_{10} \tau$  (s) x Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\tau$  é chamado de tempo de relaxação e depende fortemente da temperatura. Tempos de relaxação para magnetita monodomínio (SD) são ilustrados pela figura acima. O tempo de relaxação é inferior a 1 microssegundo a 575°C mas supera a idade da Terra a 510°C. Considerando-se um tempo de relaxação crítico de 100 s, este grão deveria comportar-se entre superparamagnético e SD a 550°C. A temperatura em qual ocorre esta transição é chamada de Temperatura de bloqueio ( $T_b$ ). Entre a temperatura de Curie ( $T_c$ ) e  $T_b$ , o mineral é ferromagnético, mas a magnetização remanescente dentro de um grupo de grãos vai cair rapidamente. Como os minerais ferromagnéticos que constituem as rochas terrestres apresentam uma distribuição de tamanho e forma de grão muito variável, os valores de  $T_b$  podem variar entre a temperatura de superfície e a  $T_c$ .

## 2.5 ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA

Em poucas rochas, a magnetização induzida tem a mesma intensidade qualquer que seja direção do campo aplicado. Essas amostras denominam-se isotrópicas. O caso mais comum revela uma dependência da magnetização induzida perante a direção ao longo da qual é aplicado o campo indutor. Tais rochas são denominadas anisotrópicas.

### 2.5.1 Tensor da Susceptibilidade Magnética

A variação da susceptibilidade magnética com a orientação do campo aplicado é descrita através de um tensor cartesiano simétrico de segunda ordem,

$$M_i = \chi_{ij} \cdot H_j$$

que é uma forma contraída da expressão:

$$M_1 = \chi_{11}H_1 + \chi_{12}H_2 + \chi_{13}H_3$$

$$M_2 = \chi_{21}H_1 + \chi_{22}H_2 + \chi_{23}H_3$$

$$M_3 = \chi_{31}H_1 + \chi_{32}H_2 + \chi_{33}H_3$$

em que 1, 2 e 3 representam os índices das direções coordenadas. A magnitude desta anisotropia, esteja ela associada a minerais ferromagnéticos, paramagnéticos ou diamagnéticos, depende de dois fatores: a anisotropia das próprias partículas e o grau do seu alinhamento.

A anisotropia das próprias partículas compreende duas componentes – anisotropia cristalina e de forma. A anisotropia cristalina, surge da ação da rede cristalina na orientação dos spins dos elétrons, conduzindo a uma orientação preferencial segundo determinadas direções, denominadas por eixo ou plano ‘fácil’. A anisotropia de forma, surge pelo fato de ao aplicarmos um campo externo geramos polos magnéticos “norte” e “sul” nas extremidades dos grãos da rocha. Em grãos com forma assimétrica, as forças magnetoestáticas geradas são mínimas quando os polos superficiais estão mais distantes, pelo que a magnetização se realiza preferencialmente ao longo do eixo maior do grão.

No caso da magnetita, a anisotropia cristalina é muito reduzida porque a anisotropia de forma domina. Noutros casos, como na hematita, a anisotropia cristalina é dominante. Existem, no entanto, maiores diferenças entre a resposta anisotrópica destes minerais, que são determinadas pelo tamanho do grão.

A magnitude da anisotropia de uma rocha será máxima quando o eixo cristalino ‘fácil’ dos grãos e os seus eixos longos (forma) possuem a mesma orientação. Saliente-se que não existe nenhum método que possibilite descortinar a contribuição dos dois fatores. Por exemplo, uma rocha que contenha um fraco alinhamento mas tenha partículas fortemente anisotrópicas, poderá exibir uma anisotropia similar à que derive de um bom alinhamento de grãos, mas com partículas fracamente anisotrópicas.

Uma vez que a susceptibilidade é representada por um tensor cartesiano simétrico de segunda ordem, pode-se determinar um sistema de eixos particular no qual o tensor da susceptibilidade se reduz aos termos diagonais.

Neste sistema de eixos, designado por Sistema de Eixos Principais, a susceptibilidade será dada por:

$$\chi_{ij} = \begin{bmatrix} \chi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \chi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \chi_3 \end{bmatrix}$$

### 2.5.2 Magnitude da anisotropia

A quantificação do grau de anisotropia da susceptibilidade magnética de uma dada rocha pode ser alcançada a partir da determinação do grau de anisotropia corrigido de Jelinek, designado habitualmente por  $P'$ , e definido por:

$$P' = \exp \sqrt{2 [(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]}$$

onde  $\eta_1 = \ln(\chi_1)$ ,  $\eta_2 = \ln(\chi_2)$ ,  $\eta_3 = \ln(\chi_3)$  são os logaritmos naturais das susceptibilidades principais e  $\eta_m = \langle \eta_1, \eta_2, \eta_3 \rangle$  é a respectiva média logarítmica. Este parâmetro é utilizado de forma generalizada, já que incorpora a utilização da média logarítmica e utiliza as três susceptibilidades principais.

### 2.5.3 Parâmetro de forma

A excentricidade do elipsoide magnético pode ser quantificada de formas diversas. É recomendada por Tarling e Hrouda (1993) a utilização do parâmetro de forma  $T$ , definido por:

$$T = \left( 2 \frac{\eta_2 - \eta_3}{\eta_1 - \eta_2} \right) - 1$$

Elipsoides oblatos correspondem a valores de  $0 < T \leq 1$ , enquanto que os elipsoides prolatos correspondem a valores de  $-1 \leq T < 0$ . Elipsoides neutros correspondem a valores nulos de  $T$ . É habitual a representação de  $P'(T)$  habitualmente designada por diagrama de Jelinek.

## 2.6 ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA E A RELAÇÃO COM A TRAMA DA ROCHAS

A ASM está diretamente ligada à trama da rocha. No caso das rochas sedimentares, por exemplo, a trama primária da rocha é influenciada pelos processos deposicionais e pós-deposicionais e pelo desenvolvimento inicial do metamorfismo de baixo grau. A forma do elipsoide da ASM vai depender essencialmente do regime deposicional. Já a trama magnética das rochas ígneas é influenciada principalmente pelas titanomagnetitas, ilmenitas e hematitas. Estes minerais possuem ponto de fusão elevado, de tal forma que no decorrer do resfriamento se comportam como sólidos carregados no fluxo magmático. Situação idêntica ocorre com outros cristais para- e diamagnéticos, como as olivinas, piroxênios ou feldspatos.

Uma vez que a viscosidade do magma é muito superior à viscosidade da água (que determina a fábrica magnética das rochas sedimentares), e que a temperatura em que cessa o fluxo viscoso é muito superior à temperatura de Curie dos materiais ferromagnéticos, pode-se concluir que (i) o efeito do campo gravitacional é insignificante no que diz respeito ao alinhamento dos cristais individuais, (ii) o campo geomagnético não influencia significativamente o alinhamento dos cristais, (iii) a trama magnética associada com os materiais ferromagnéticos mimetiza a trama dos minerais paramagnéticos, dos quais se formaram por alteração deutérica, química ou física.

Deste modo, o método vem sendo muito utilizado no estudo estrutural de corpos graníticos devido a essa correlação existente entre a trama

mineral da rocha e o elipsoide de susceptibilidade magnética. Os estudos de ASM têm-se revelado de grande utilidade em rochas com anisotropia muito baixa já que permitem detectar foliações e lineações que não são perceptíveis com os métodos clássicos de análise estrutural.

## **CAPÍTULO III**

### **TÉCNICAS E MÉTODOS**

A obtenção de dados de ASM envolveu várias etapas, desde a aquisição e integração de mapas topográficos, geológicos e imagens de satélite para a campanha de campo até a leitura das medidas magnéticas, que foi realizada no Laboratório de Magnetismo de Rocha da Universidade de São Paulo. Neste capítulo, serão abordadas todas as etapas do trabalho de aquisição dos dados magnéticos.

#### **3.1 INTEGRAÇÃO DE DADOS**

Pelo fato da amostragem ser feita com uma perfuratriz específica, pesada e que necessita de água para sua refrigeração, fica difícil percorrer longas distâncias sem viatura de campo, é de suma importância termos conhecimento de estradas, acessos, geologia e bons afloramentos da região. Para isso, foi feito a integração de todos os dados existentes da área de estudo em um Sistema de Informação Geográfica utilizando o software *ArcGIS 10*.

Foi elaborado um mapa base para a campanha de campo onde foram integrados dados de mapeamentos geológicos, trabalhos de mestrado e doutorado feitos na área. Imagens de satélite também foram adicionadas. Com esses dados sobrepostos sobre uma base cartográfica completa e atualizada, foi possível fazer uma avaliação de dados pré-existentes e estabelecer grandes perfis, abrangendo desde o contato do MSP com suas encaixantes até as porções mais centrais do corpo, sendo possível local

furos nos locais certos registrando a variação faciológica do Maciço, segundo uma malha de pontos tão regular quanto possível.

Além disso, é imprescindível encontrar bons afloramentos de rocha *in situ*, pois as amostras precisam ser orientadas, caso contrário, os dados direcionais obtidos com o método não terão validade. É importante encontrar afloramentos onde a quantidade de fraturas e o nível de alteração da rocha sejam baixos ou nulo. Como a amostragem é feita com uma máquina robusta, se a rocha apresentar fraturas ou alteração, irá se desintegrar dentro da broca. Para isso, foi utilizado o mapa de localização e amostragem e as cadernetas dos mapeamentos realizados por UFRGS 2008, 2009 .

Por se tratar de um corpo com aproximadamente 140 km<sup>2</sup>, o objetivo da primeira etapa de campo foi coletar testemunhos em locais previamente estabelecidos, segundo uma malha de pontos tão regular quanto possível em toda a extensão do corpo, visando amostrar todas as fácies.

### **3.2 AMOSTRAGEM**

A campanha de campo consistiu em duas etapas, uma de dez e outra de quatro dias. A primeira etapa teve como objetivo coletar testemunhos cilíndricos regularmente espaçados em todas as fácies do Maciço, bem como, uma descrição textural e a obtenção dados estruturais de cada sítio de amostragem. A segunda etapa de campo foi realizada visando cobrir os locais do mapa onde ficaram grandes áreas sem amostragem, que foi, principalmente, na fácies quartzo sienítica, que é a que apresenta o maior grau de alteração da rocha e a menor quantidade de afloramentos.

Foram realizadas amostragens em 46 sítios, sendo retirados, em média, 10 cilindros de 1" de diâmetro e de 3 a 15 cm de comprimento, por sítio. Isso resultou em mais de 1200 espécimes, média de 26 por sítio.

A amostragem foi feita utilizando uma perfuratriz portátil *STHIL* com motor dois tempos movido a gasolina que utiliza uma broca cilíndrica oca, de 1" de diâmetro por 20 cm de comprimento, com a extremidade diamantada. É acoplado ao sistema, um tubo onde contém mistura de água com óleo

solúvel biodegradável sob pressão, que é liberado diretamente no interior da broca, fazendo com que refrigere-a e diminua o atrito com a rocha.

É de extrema importância que se tenha cem por cento de certeza que a rocha a ser amostrada encontra-se *in situ*, caso contrário, a análise dos dados direcionais será inválida. O grau de alteração da rocha deve ser nulo ou mínimo. A alteração faz com que a rocha se fragmente ou até mesmo, dependendo o caso, se desintegre devido ao alto atrito produzido pela broca. Deve-se evitar também, zonas de cataclase e locais onde há muitas fraturas, além da rocha estar mais alterada nesses locais, qualquer plano de fraqueza faz com que o cilindro quebre e emperre dentro da broca, sendo necessária a remoção da broca e a retirada e colagem do cilindro.

Concluída a perfuração os cilindros devem ser orientados, e para que não haja a desorientação do cilindro caso ele quebre (o que é comum), uma marcação com a própria broca é feita no topo do mesmo, antes da perfuração ser iniciada (Fig. 8).



Figura 8) (A) Cilindros que não quebraram com a perfuração; (B) Cilindros que quebraram com a perfuração, mas serão facilmente recolocados na posição correta devido a marcações previamente feitas.

Para registrar a posição espacial original de cada amostra, usa-se um orientador (Fig. 9), que consiste de uma haste cilíndrica oca com o mesmo diâmetro do furo, em cuja extremidade é acoplada uma bússola

convencional do tipo *Brunton* e um bússola solar, de modo que a leitura pode ser feita mesmo em rochas fortemente magnéticas, além de um transferidor para medida do ângulo de inclinação do furo. O orientador é introduzido nos furos e ajustado de modo que a bolha de nivelamento da bússola fique na posição central, indicando que a bússola encontrasse na posição horizontal. Feito isso, são efetuadas as leituras das bússolas magnética e solar (esta inclui a leitura do horário) e da inclinação em que o cilindro foi retirado.



Figura 9) Orientador dos testemunhos cilíndricos: (A) Haste de alumínio com ranhura na base; (B) Bússola tipo Brunton acoplada; (C) Transferidor de 360° e haste de metal, para leitura do azimute solar; (D) Transferidor de 90° para medir a inclinação do furo.

Nos furos em que o cilindro não quebra no ato da perfuração, o orientador é colocado sem a retirada do testemunho, e via ranhura, é feita uma marcação diretamente no cilindro utilizando um arame de metal, para depois ser retirado e identificado. Quando o testemunho cilíndrico quebra, a marcação é feita com marcador permanente na rocha do lado externo do furo, sendo repassado ao cilindro quando o mesmo é colocado na posição original (Fig. 10).

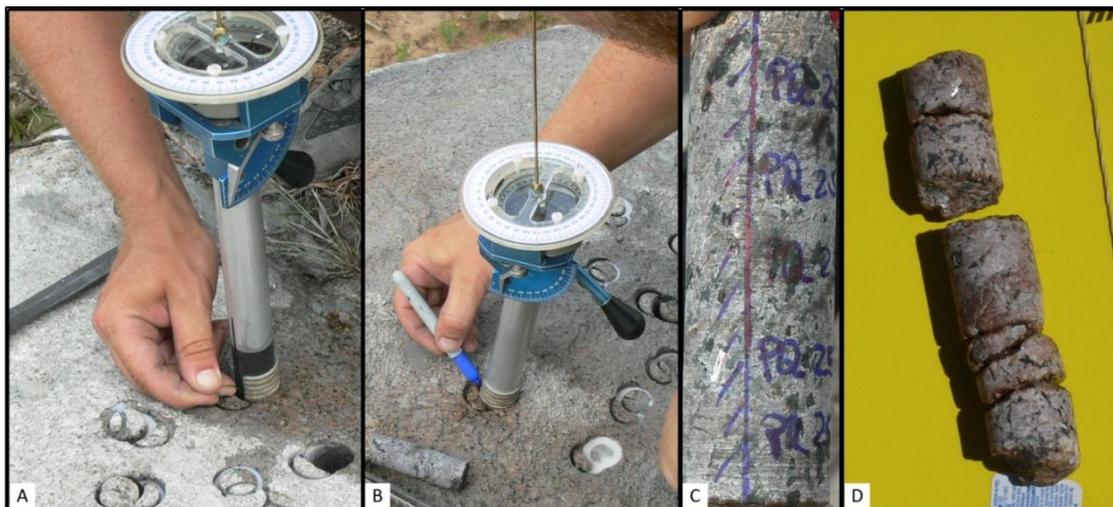


Figura 10) (A) Marcação sendo feita diretamente no cilindro; (B) Marcação sendo feita de modo indireto, caso o cilindro quebre; (C) Cilindro orientado e identificado; (D) Cilindro que se fragmentou durante o processo de perfuração, necessita ser remontado e colado.

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para efetuar a leitura das medidas magnéticas, os cilindros tiveram que ser serrados em pedaços de até 22mm, chamados de espécimes. O corte foi feito em uma serra específica (Fig. 11), do laboratório de preparação de amostras da Universidade de São Paulo.

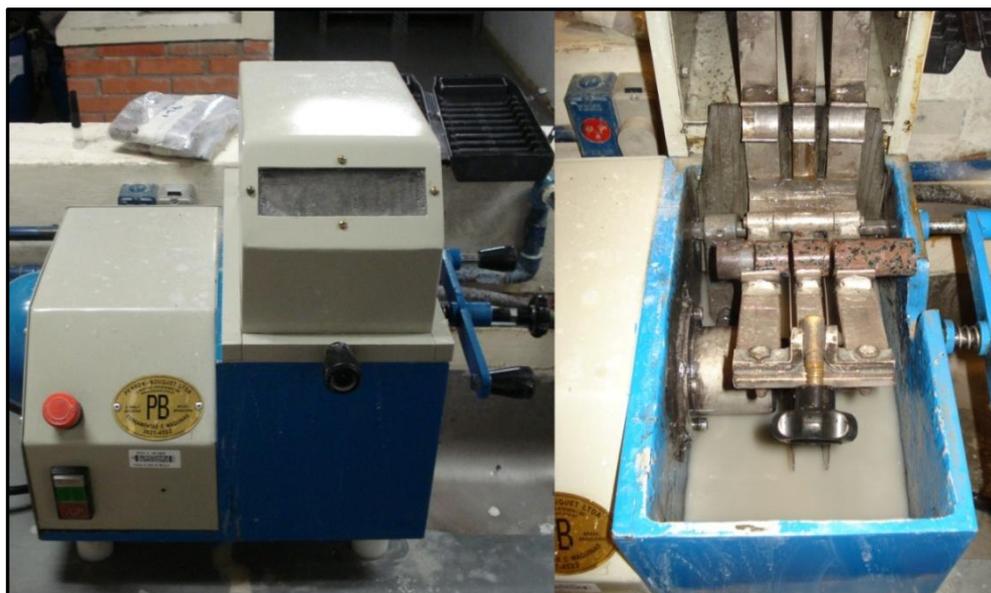


Figura 11) Serra utilizada para o fatiamento dos cilindros.

Após serrados, os espécimes são renomeados e marcações específicas são feitas, que facilitarão o posicionamento dos mesmos na hora de aquisição das medidas magnéticas. Por fim, os espécimes são embalados em papel filme, para que não haja contaminação nos equipamentos.

### **3.4 LEITURA DAS MEDIDAS MAGNÉTICAS**

As leituras foram feitas em um susceptímetro KAPPABRIDGE KLY-4S da AGICO, no Laboratório de Magnetismo de Rocha da Universidade de São Paulo e os dados foram processados através do programa *ANISOFT 3*, usando a estatística de Jelinek (1977).

A obtenção das medidas magnéticas de cada espécime consiste na leitura em três posições diferentes do cilindro (três eixos ortogonais entre si), e mais uma para o valor de anisotropia total. Em cada eixo, são medidos valores de susceptibilidade magnética em cinco posições diferentes (Fig. 12).

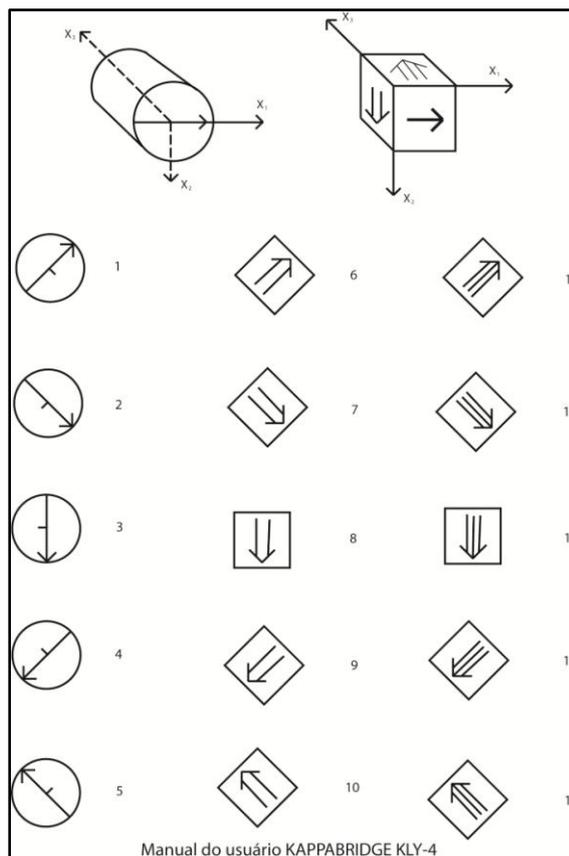


Figura 12) Leituras realizadas em cada espécime.

Os principais cuidados adotados na amostragem são quanto à identificação dos furos e dos cilindros para que não haja troca. Deve ser feito um croqui esquemático com a ordem de numeração dos furos, e os testemunhos devem ser identificados logo após a orientação.

Ao fazer a leitura das medidas, é necessário muita atenção na posição em que a amostra é colocada no susceptímetro, para que não haja inversão do eixo a ser lido. Deve-se cuidar também quanto a equipamentos magnéticos dentro do laboratório (telefones celulares, notebooks, etc.) para que não ocorra qualquer tipo de interferência.

### 3.5 REPRESENTAÇÃO DOS DADOS

A ASM é descrita matematicamente por um tensor de segunda ordem e é representada através de um elipsoide triaxial de susceptibilidade de dimensões definidas pelos valores das susceptibilidades principais, no qual

os três eixos ortogonais definem as direções ao longo das quais a magnetização induzida é paralela ao campo aplicado.

Os valores das susceptibilidades magnéticas principais são representados por:  $k_{max}$  ( $k_1$ ) sendo o eixo de maior susceptibilidade e representando a lineação magnética;  $k_{int}$  ( $k_2$ ) o eixo de susceptibilidade intermediária; e  $k_{min}$  ( $k_3$ ) o eixo de menor susceptibilidade, representando o polo da foliação magnética (Bouchez, 1997). A estes eixos são atribuídos valores escalares e direcionais (declinação/inclinação). A partir dos dados escalares, são calculados a magnitude da anisotropia e o parâmetro de forma.

Deste modo, quando possuímos um conjunto de medidas de ASM representativos de uma mesma formação geológica, podemos representar os valores direcionais das susceptibilidades principais em um estereograma. Por convenção a susceptibilidade máxima é representada por “quadrados”, a susceptibilidade intermédia por “triângulos” e a susceptibilidade mínima por “círculos”. Um exemplo dessa representação é dado na figura 13.

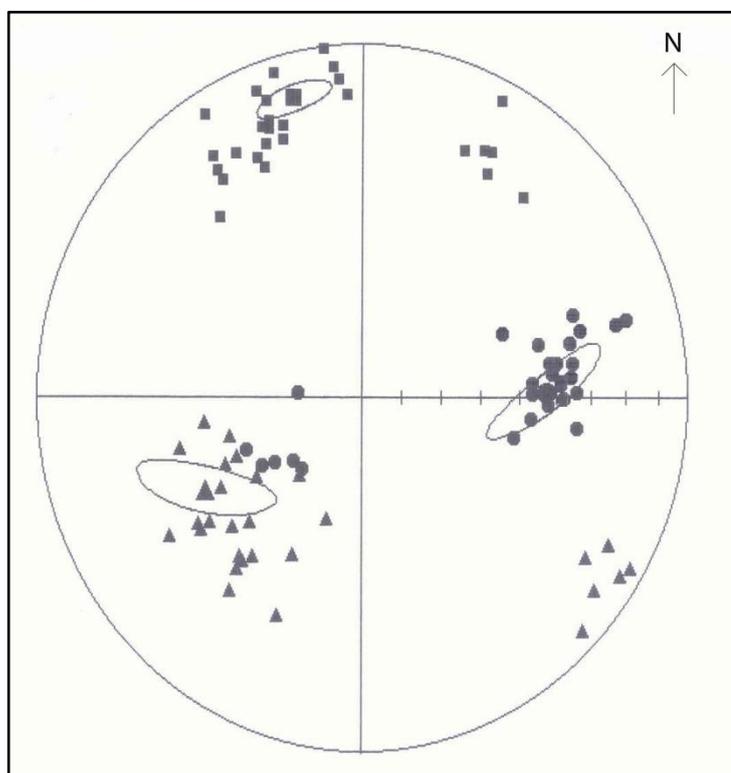


Figura 13) Representação estereográfica dos dados direcionais de ASM.

## CAPÍTULO IV

### CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Escudo Sul-rio-grandense (Fig. 14) abrange uma área de 65.000 km<sup>2</sup> e é o resultado dos processos de geração e deformação de crosta continental, cuja contribuição maior ocorreu em dois ciclos orogênicos, o Transamazônico (2,26-2,00 Ga) e o Brasileiro (900-535 Ma). Cada ciclo incluiu a extração de magmas e, possivelmente também, de porções sólidas do manto, com a decorrente construção de crosta oceânica (planície basáltica e sedimentos abissais, platôs oceânicos, ilhas oceânicas), presença de microcontinentes nos oceanos, arcos de ilhas vulcânicas nos oceanos e nas margens continentais. Essas associações de rochas colidiram sequencialmente e contribuíram para o crescimento da porção sul do continente sul-americano (Hartmann *et al.*, 2007b).

O Ciclo Brasileiro foi responsável pela construção do Cinturão Dom Feliciano, e compreende três eventos tectônicos principais (Hartmann *et al.*, 1999, 2000, 2007a): (1) o início de atividade de subducção, marcada pelo metadiorito Passinho (880 Ma), que é o evento tectônico Neoproterozóico mais velho do sul do Brasil (evento Passinho); (2) a Orogênese São Gabriel, que é o evento de desenvolvimento do arco magmático do Terreno São Gabriel (753-680 Ma), com a formação dos Complexos Cambaí e Palma/Bossoroca; (3) a Orogênese Dom Feliciano, que representa a extensa fusão dos remanescentes crustais antigos presentes no Batólito Pelotas,

seguido da intrusão amplamente distribuída de granitos sin-, tardi- e pós-colisionais.

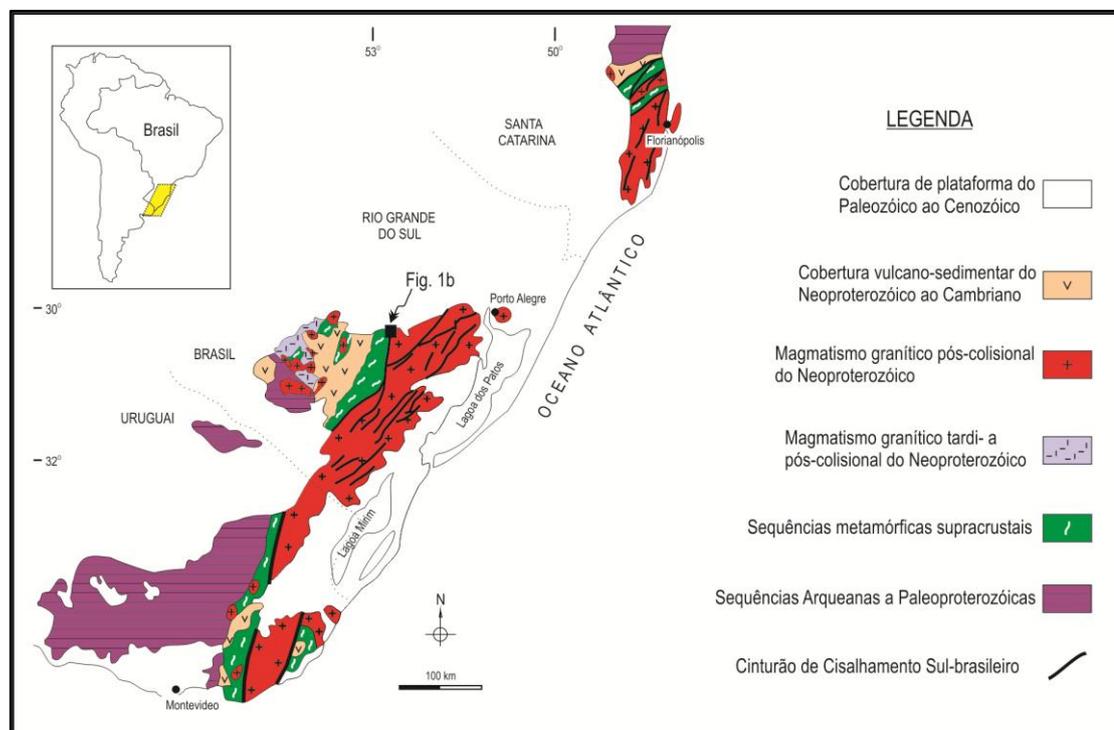


Figura 14) Escudos Sul-rio-grandense e Uruguai (Modificado de Bitencourt 2011).

O MSP (Fig. 15) está inserido no Bloco Encruzilhada do Sul, que pertence ao Batólito Pelotas, com domínio ocidental em relação à Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal do Canguçu. É relacionado ao magmatismo shoshonítico da Formação Arroio dos Nobres, gerado nas fases iniciais do Batólito, com idades Pb-Pb em zircão de  $611 \pm 3$  Ma (Philipp *et al.*, 2002).

As rochas encaixantes do MSP apresentam composição, textura, gênese e idades variadas. A leste/nordeste é intrusivo em gnaisses e sienitos sintectônicos do CVC; no extremo norte, intrude xistos pelíticos e quartzitos do Complexo Metamórfico Porongos. Em praticamente toda porção oeste do Maciço, é limitado por falhas de orientação NE-SW e NW-SE que o separa de ritmitos areno-pelíticos (Formação Arroio dos Nobres, Membro Mangueirão) e conglomerados (Formação Arroio dos Nobres, Membro Vargas) contendo clastos do próprio MSP. A sul/sudeste, o MSP é intrudido pelo Complexo Granítico Encruzilhada do Sul.

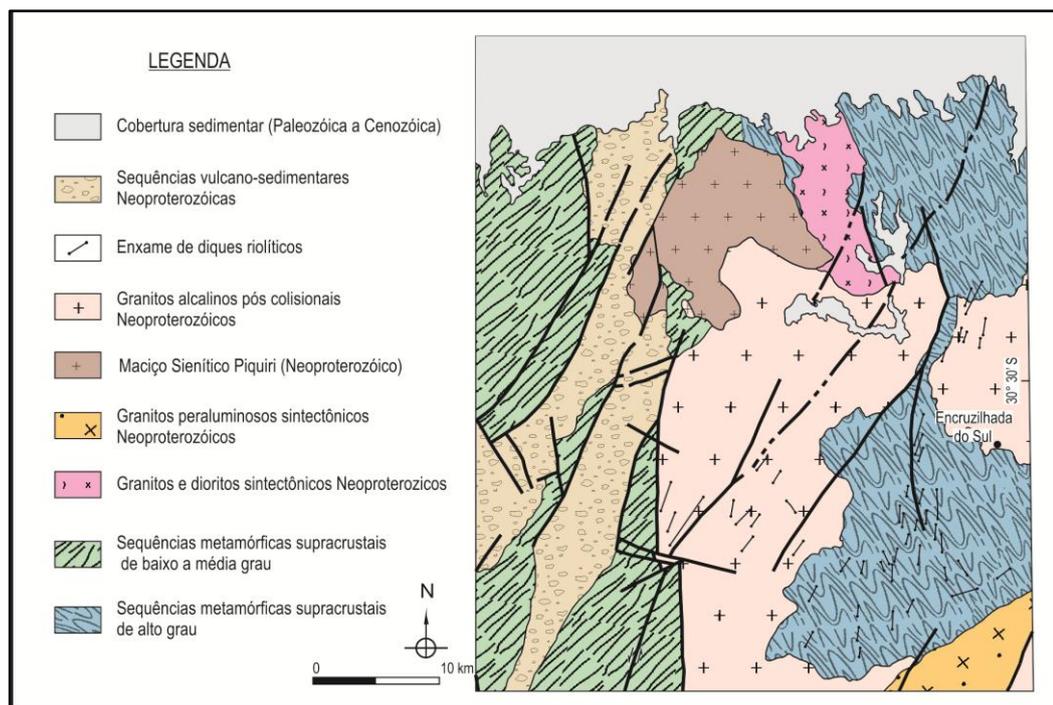


Figura 15) Contexto regional do Maciço Sienítico Piquiri (Modificado de Bitencourt 2011).

## 4.2 GEOLOGIA DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI

O Maciço Sienítico Piquiri situa-se a aproximadamente 25 km a noroeste da cidade de Encruzilhada do Sul, RS e possui forma praticamente circular com uma área de aproximadamente 140 km<sup>2</sup> e é uma importante ocorrência de rocha ornamental no sul do Brasil. Foram primeiro descritas por Picada (1963) quando foram interpretadas como produto do metamorfismo regional sobre rochas aluminosas de idade Pré-Cambriana, sendo denominadas por Tessari & Picada (1966) de Sienito Gnáissico Piquiri.

O interesse sobre essas rochas alcalinas foi novamente despertado somente no começo da década de 1980, quando constatou-se que os granitóides estaníferos da região, assim como as intrusões alcalinas, não apenas são eventos finais do Ciclo Brasileiro, quanto são geograficamente próximos e estão controlados pelos mesmos lineamentos (Jost, 1981; Frantz e Jost, 1983; Jost *et al.*, 1984). Essa suspeita inicial de que os granitóides

estaníferos e o MSP poderiam ser intrusões correlatas foi logo desfeita por razões estruturais, cronológicas e petroquímicas.

Em 1985, o termo Sienito Gnáissico Piquiri foi substituído por Jost *et al.* por Sienito Piquiri, e, posteriormente, devido à diversidade composicional de suas litologias, foi redefinido por Vieira *et al.* (1989) como Maciço Sienítico Piquiri.

As rochas do MSP são mesocráticas a leucocráticas, de coloração rosa acinzentada, variando a tons mais claros em direção ao centro do corpo. Possuem textura equigranular variando de fina a grossa, raramente porfirítica, com concentrações de minerais máficos e megacristais de feldspato alcalino localizadamente. Afloram na forma de campo de matações, lajeados em campo aberto ou em leito de arroios, porém, as exposições mais significativas encontram-se nas frentes de grandes pedreiras, e em pedreiras de fundo de quintal, muito comuns na região. Nesses locais a rocha ocorre inalterada, ou com pouca alteração, facilitando a observação de feições macroscópicas.

O MSP possui foliação magmática marcada principalmente pelo alinhamento dimensional dos cristais de K-feldspato e em geral acompanhada pelo alinhamento de agregados de minerais máficos e enclaves máficos microgranulares. A geometria dessa trama planar acompanha o contato do MSP com suas encaixantes, em geral com alto ângulo de mergulho. A mesma feição é observada no contato entre as diferentes fácies do Maciço. O grau de desenvolvimento da estrutura planar é maior nos termos da fácies principal do Maciço. Com relação à existência de trama linear do MSP, nunca se chegou a um consenso entre os autores. Segundo Vieira Jr. *et al.* (1989), a estrutura mais evidente é um trama  $S > L$ . Na descrição apresentada por Nardi *et al.* (2008), não são observadas estruturas lineares nas rochas do MSP.

Os sienitos são interpretados como resultado de mistura de magmas ácidos e básicos, fracionamento, fluxo viscoso e assimilação das encaixantes, o que é evidenciado pela grande quantidade de enclaves máficos microgranulares, *schlieren*, camadas máficas cumuláticas, autólitos de granulação fina e, principalmente, uma trama planar fortemente orientada

(Vieira *et al.*, 1989; Stabel, 2000; Nardi *et al.* 2007, 2008). Stabel (2000) sugere ainda que, devido à natureza geoquímica e petrológica particular dessas rochas, é um magmatismo de afinidade shoshonítica que sofreu processos de mistura com magmas lamprofíricos. O caráter ultrapotássico deste magmatismo foi estabelecido por Nardi *et al.* (2007).

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 ATUALIZAÇÃO DO MAPA

O mapeamento recente dessa intrusão foi efetuado por UFRGS (2008 e 2009), e a faciologia empregada no presente estudo é modificada a partir dos resultados obtidos nesses trabalhos.

O MSP apresenta quatro fácies principais, mostradas na figura 16: a *fácies de borda* (i) que abrange as porções mais externas do corpo, é composta por sienitos e feldspato-alcálico sienitos de textura equigranular fina a média, localizadamente porfirítica e índice de cor (M') variando de 15 a 30%; a *fácies principal* (ii) que constitui a maior parte do corpo, é composta por feldspato-alcálico sienitos de textura equigranular média a grossa com M' entre 5 e 15%, comumente contendo cumulos e *schlieren* máficos; a zona central do Maciço abriga quartzo sienitos (iii) de granulação média a grossa com M' baixo (2-8%) e dois pequenos corpos de sienogranito (iv), também de granulação média a grossa, porém com M' um pouco mais elevado (~10%).

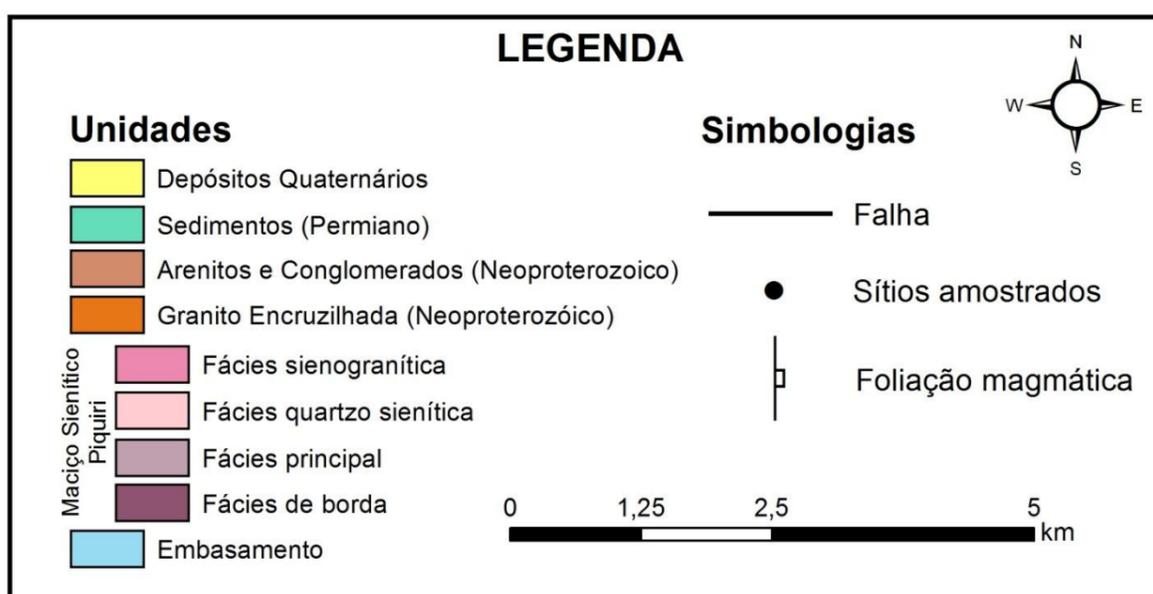
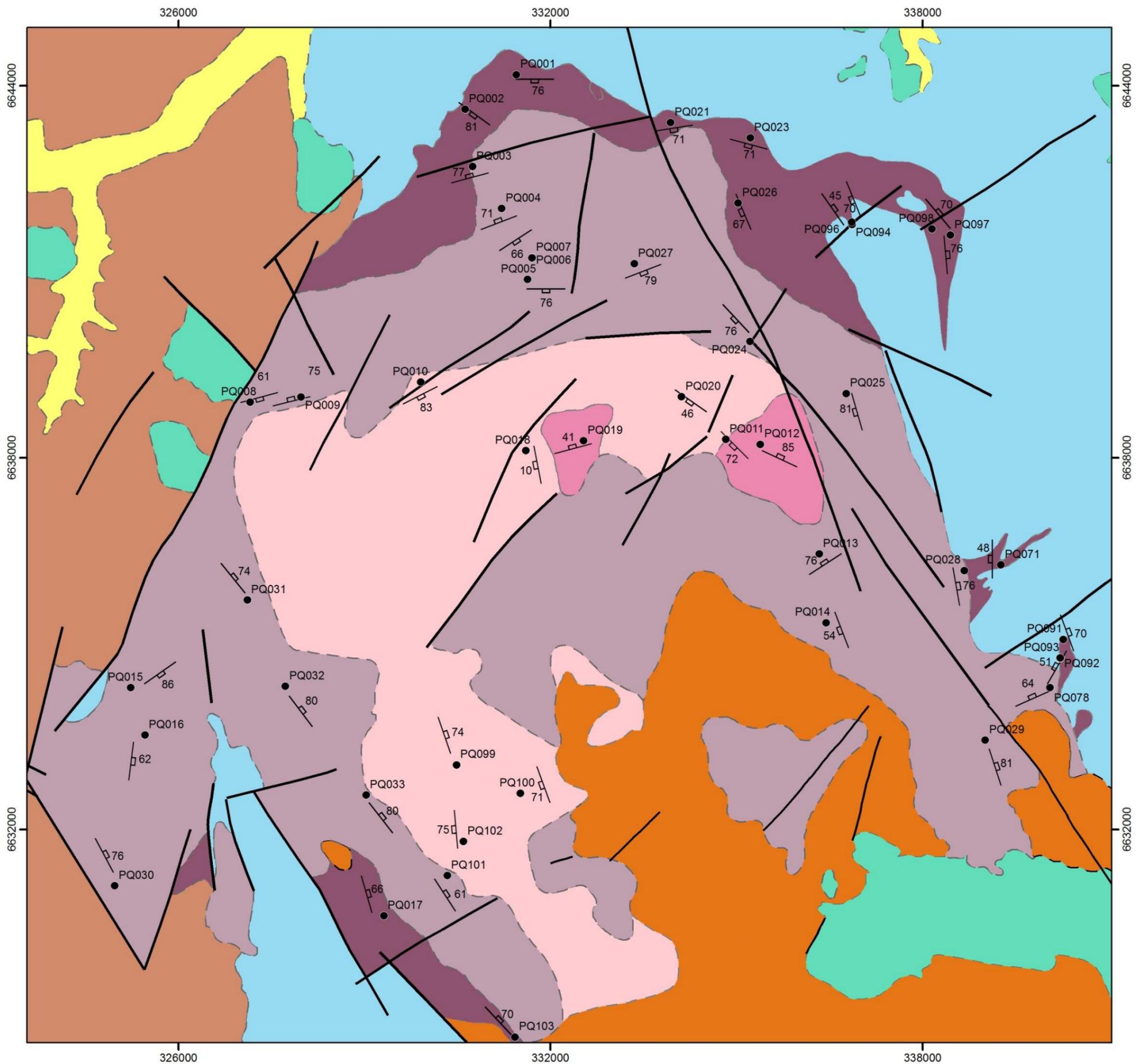


Figura 16) Mapa geológico do Maciço Siático Piquiri e localização dos pontos amostrados.

Com as campanhas de campo realizadas na região do MSP foi possível aprimorar os contatos leste/nordeste, onde há apófises da fácies de borda do Maciço intrusiva em gnaisses do CVC e granitoides sintenctônicos e na porção oeste do corpo, onde é limitado por falhas com os ritmitos da Formação Arroio dos Nobres.

Sempre houve muita discussão sobre a porção leste/nordeste do MSP. É a porção onde existem apófises da fácies de borda do Maciço intrudindo os gnaisses encaixantes. A partir do mapeamento 1:25000 realizado por UFRGS (2008), foi possível delimitar essas apófises com maior precisão, mas ao mesmo tempo, pensou-se que poderia haver contatos por falhas, devido à formas estranhas que os corpos apresentam. Porém, com os trabalhos de campo realizados para este trabalho, os contatos tectônicos não se confirmaram.

Nestes locais, é possível observar as rochas da fácies principal intrudindo as da fácies de borda. Nos sítios PQ-091, PQ-092/093 observa-se essa relação. Na porção nordeste da intrusão, onde a fácies de borda contorna as encaixantes, não é possível notar essa relação na escala de afloramento, mas nota-se que afloram os sienitos da fácies principal porém com uma quantidade maior de máficos (PQ-096 e PQ-098). No extremo norte e a porção do sudoeste - o restante da fácies de borda - não se observa qualquer tipo de feição de contato entre essas fácies.

Em um dos locais onde se observa o MSP intrudindo as encaixantes, foram amostrados, além do Maciço, sienitos sintectônicos do CVC, para ver se era possível distinguir as assinaturas magnéticas do MSP e dos sienitos encaixantes. As rochas apresentaram dados direcionais e escalares completamente distintos e o padrão da trama planar e linear do Maciço seguiu o *trend* local (Fig. 17).

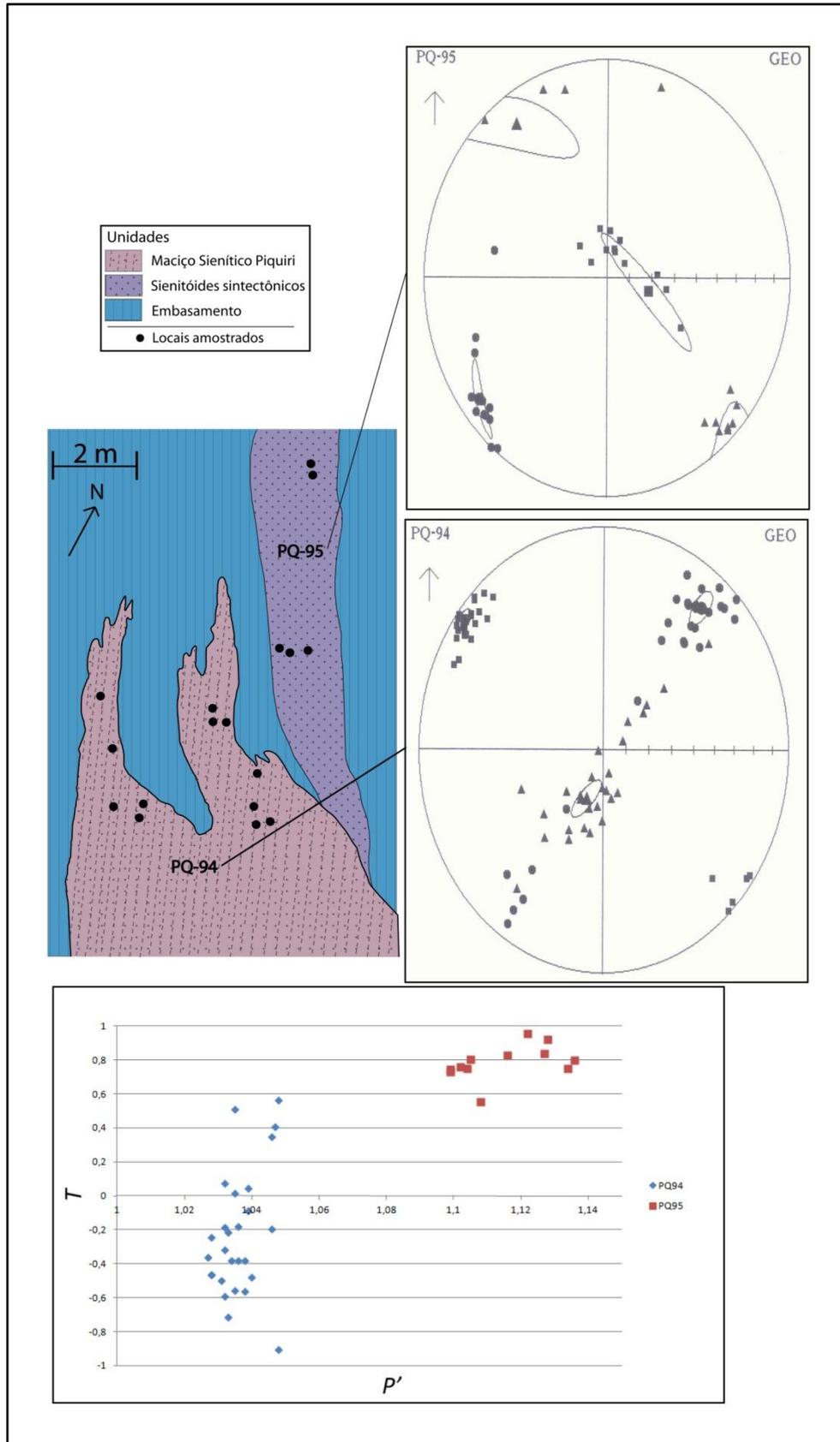


Figura 17) Croqui esquemático dos sítios PQ-094 / PQ-095 com os respectivos estereogramas magneto-estruturais e gráfico do Grau da anisotropia vs. Parâmetro de forma de todos espécimes dos sítios.

A região do extremo oeste/sudoeste do MSP não tinha sido abrangida nos mapeamentos em 2008 e 2009 e o contato com os ritmitos da Formação Arroio dos Nobres não estavam bem definido em mapas anteriores. Foram realizados quatro perfis na direção W – E, sempre partindo das sedimentares em direção ao Maciço. Nesse local (oeste/noroeste do ponto PQ-030) Foi possível traçar o contato com precisão, que é delimitado por falhas NE-SW e NW-SE.

## **5.2 AMOSTRAGEM**

Mais de 1200 espécimes cilíndricos, coletados em 46 sítios em toda extensão do Maciço Sienítico Piquiri (Fig. 16), tiveram as anisotropias magnéticas medidas. Os dados de ASM (escalares e direcionais) são apresentados na tabela do anexo I.

## **5.3 DADOS DE ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ESCALARES E DIRECIONAIS)**

### **5.3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FÁCIES**

A fácies de borda do MSP apresenta valores de  $k$ ,  $P'$  e  $T$  muito variados. Geralmente, a susceptibilidade magnética e magnitude da anisotropia apresentam valores elevados, exceto na porção leste, nos pontos situados nas apófises da fácies de borda intrusivos nos gnaisses. O parâmetro de forma apresenta valores negativos a positivos, mas tende a apresentar características mais prolatas. As foliações magnéticas acompanham o formato da intrusão, e nas apófises, acompanha as estruturas das encaixantes. É a fácies que apresenta as lineações com os maiores ângulos encontrados, em alguns locais praticamente vertical, exceto nas apófises, onde a trama linear é quase horizontalmente.

A fácies principal apresenta valores de  $P'$  que variam de 1,04 a 1,16. O parâmetro de forma indica elipsoide predominantemente oblato, com valores maiores que 0,200. A maioria dos sítios com valores de  $T$  negativos

encontrados provavelmente se devem à proximidade com relação a outras fácies do Maciço que possuem características mais prolatas. As foliações magnéticas, acompanham o formato do corpo intrusivo, igualmente às outras fácies. A trama linear apresenta ângulos de caimento moderados a baixos, tendendo a apresentar ângulos maiores perto das encaixantes.

As rochas da fácies quartzo sienítica, embora com poucos sítios amostrados, apresenta valores baixos para o grau de anisotropia, não excedendo 1,08. Quanto ao seu parâmetro de forma, mostram uma tendência a um elipsoide neutro a levemente prolato

Com apenas 3 sítios amostrados, é difícil fazer uma caracterização da fácies sienogranítica. Apesar disso, os valores de  $P'$  ficam em torno de 1,05 (1,04 – 1,06). O parâmetro de forma e a susceptibilidade são variáveis.

### 5.3.2 DADOS ESCALARES

#### Susceptibilidade magnética

Analisando a susceptibilidade magnética da rocha  $k$  (SI de unidades), que é dada para cada sítio a partir da média aritmética [ $k = (k_{\max} + k_{\text{int}} + k_{\min}) / 3$ ] de cada espécime, pode-se dizer que, na maioria dos casos, apresenta valores altos, com uma média de  $14.39 \times 10^{-3}$ . Os valores variam de  $0.35 \times 10^{-3}$  até  $61.51 \times 10^{-3}$  (Tab. 1) e não estão diretamente ligados à faciologia do Maciço. Há uma tendência de os valores serem mais elevados quando a rocha apresenta maior quantidade de minerais máficos, o que é esperado, uma vez que a magnetita, presente nas rochas do MSP, está associado a estes minerais, conforme Stabel (2000).

As estimativas de contribuição paramagnética em rochas graníticas quando  $k < 0.5 \times 10^{-3}$  SI situam-se acima de 60% da magnitude total de susceptibilidade (Benn *et al.* 1998; Archanjo *et al.* 1999). Para  $k > 10^{-3}$  SI a susceptibilidade ferromagnética domina amplamente, compreendendo 85% a 95% da susceptibilidade total da amostra (Archanjo *et al.* 1998).

### Grau de anisotropia

O grau de anisotropia ( $P'$ ) das amostras estudadas geralmente é alto, tendo um valor médio de 10,3% (1,103), variando de 1% a 31%. Assim como os valores de  $k$ ,  $P'$  também tende a ser maior onde a presença de máficos é mais abundante. Valores de  $P' > 10\%$  são indicativos da presença de minerais ferromagnéticos e/ou de uma forte orientação da trama mineral.

Na figura 18 (gráfico  $k \times P'$ ), nota-se que há uma relação entre a susceptibilidade magnética e o grau de anisotropia, que provavelmente está ligado à mineralogia da rocha. Como não há uma caracterização da química mineral das diferentes fácies do Maciço nesse trabalho, nem estudo sobre curvas de magnetização, não foi possível verificar quais são os minerais que contribuem na magnetização da rocha, nem a relação entre esses parâmetros.

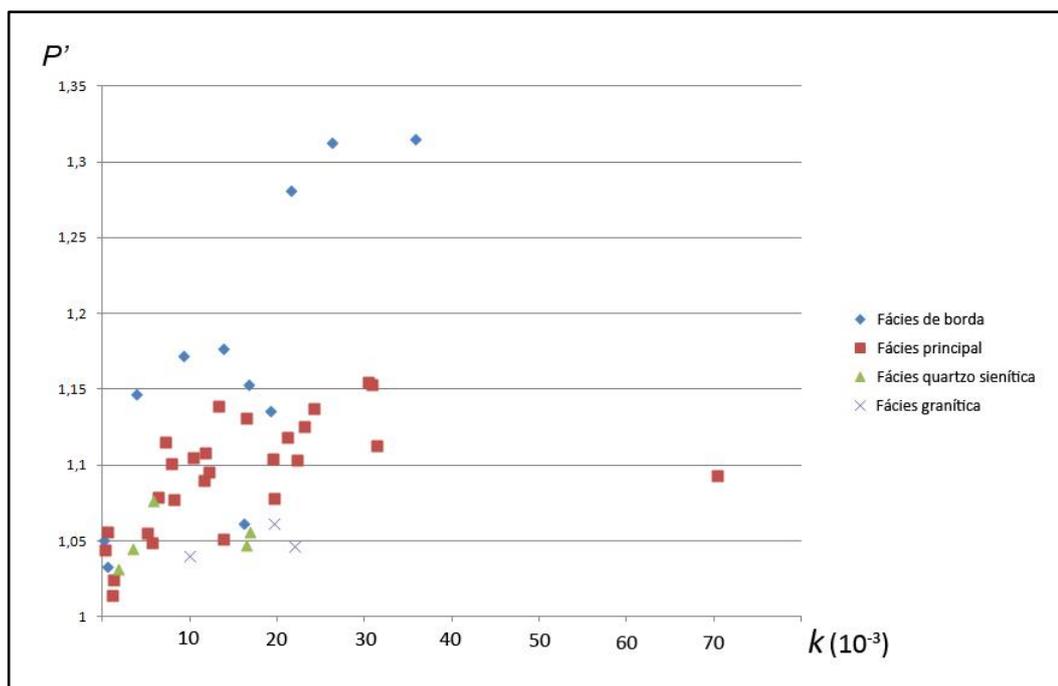


Figura 18) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. Gráfico da Susceptibilidade magnética vs. Grau de anisotropia das rochas do Maciço Sienítico Piquiri.

Apesar disso, nota-se que há pelo menos dois padrões entre as amostras: um, é dado pelas fácies de borda e principal, apresenta valores altos de  $k$  e  $P'$ . Há uma tendência da fácies de borda a apresentar maior

magnitude de anisotropia, principalmente perto de contatos com a fácies principal, podendo estar ligado ao fato de que essa fácies é intrudida e retrabalhada pela fácies principal; o outro padrão engloba as fácies centrais da intrusão, a quartzo sienítica e a sienogranítica. As amostras dessas fácies apresentam pouca variabilidade nos valores de  $P'$ , mantendo-se na faixa de 1,05. A susceptibilidade magnética também é menor se comparada ao padrão das fácies mais externas.

Foi feito um teste em um sítio na fácies principal do MSP, onde a estrutura de fluxo é dada por uma grande concentração de máficos para testar a influência que os máficos teriam nos dados de ASM. Foram coletados cilindros da parte onde a quantidade de máficos da rocha era normal (PQ-006 – Fig. 19) e cilindros diretamente em cima do concentrado de máficos (PQ-007 – Fig. 20), a variação ocorre no mesmo afloramento. Com o gráfico  $k \times P'$  (Fig. 21) de todos os espécimes deste sítio, fica evidente a influência dos máficos no comportamento da susceptibilidade magnética das rochas do MSP. Os valores dos espécimes do sítio PQ-007 são muito altos, passando de  $80 \times 10^{-3}$  em alguns espécimes.



Figura 19) Furos realizados na fácies principal do Maciço com concentração de máficos padrão (sítio PQ-006).



Figura 20) Furos realizados na fácies principal do Maciço com concentração anômala de máficos (sítio PQ-006).

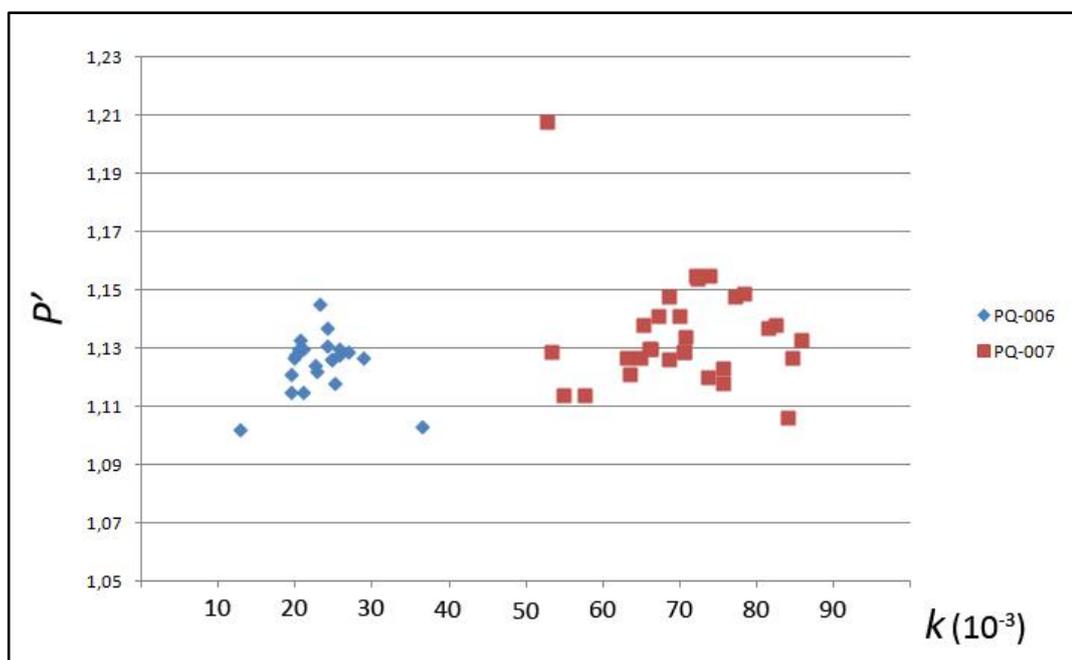


Figura 21) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - gráfico da susceptibilidade vs. grau de anisotropia dos sítios PQ-006 e PQ-007.

Nesse mesmo afloramento, foi observada a relação de intrusão de uma rocha de composição quartzo sienítica na fácies principal do Maciço (Fig. 22). Pode-se observar também, que há uma interação no contato entre

as rochas e minerais máficos do Maciço são assimilados pela rocha mais nova.

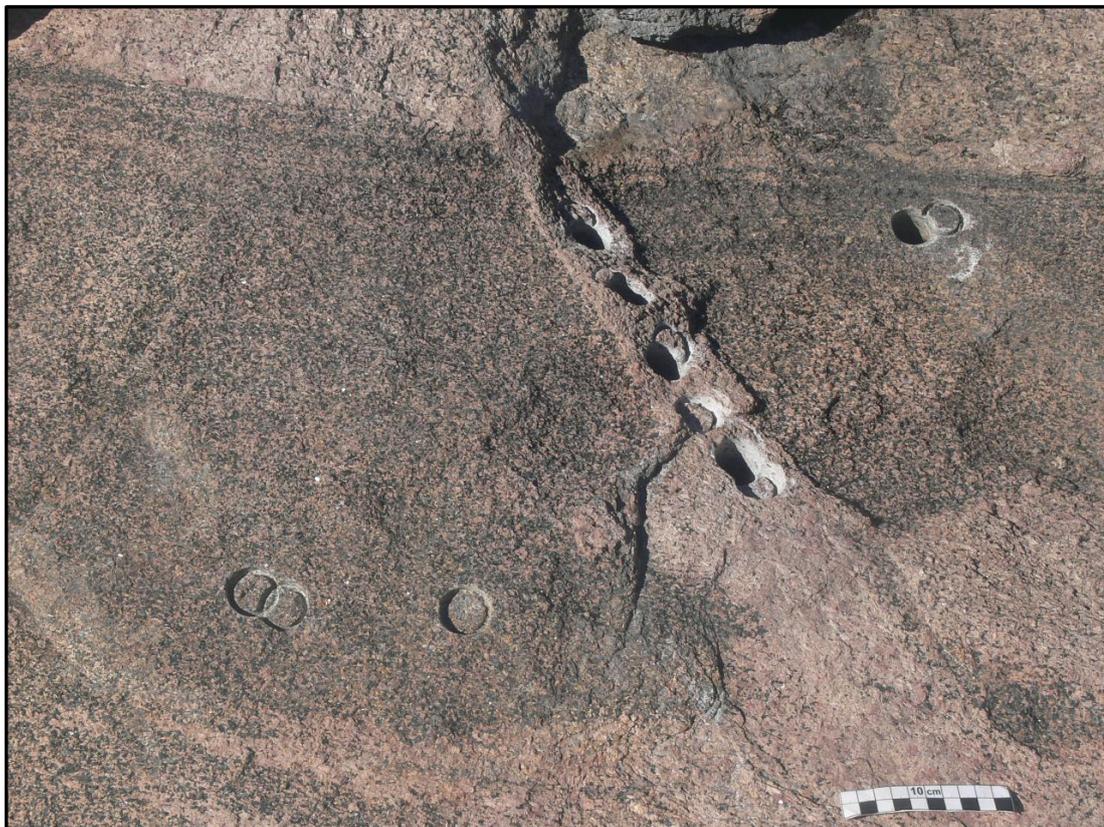


Figura 22) Furos realizados em injeção de material quartzo sienítico na fácies principal.

Colocando os dados de ASM dos sítios PQ-006 e PQ-007 em um gráfico  $k \times P'$  (Fig. 23), mais os dados de ASM da injeção quartzo sienítica e do PQ-010 que representa dados comparativos de um sítio da fácies quartzo sienítica, pode-se observar que os parâmetros da injeção quartzo sienítica e do PQ-010 tendem a seguir padrões similares.

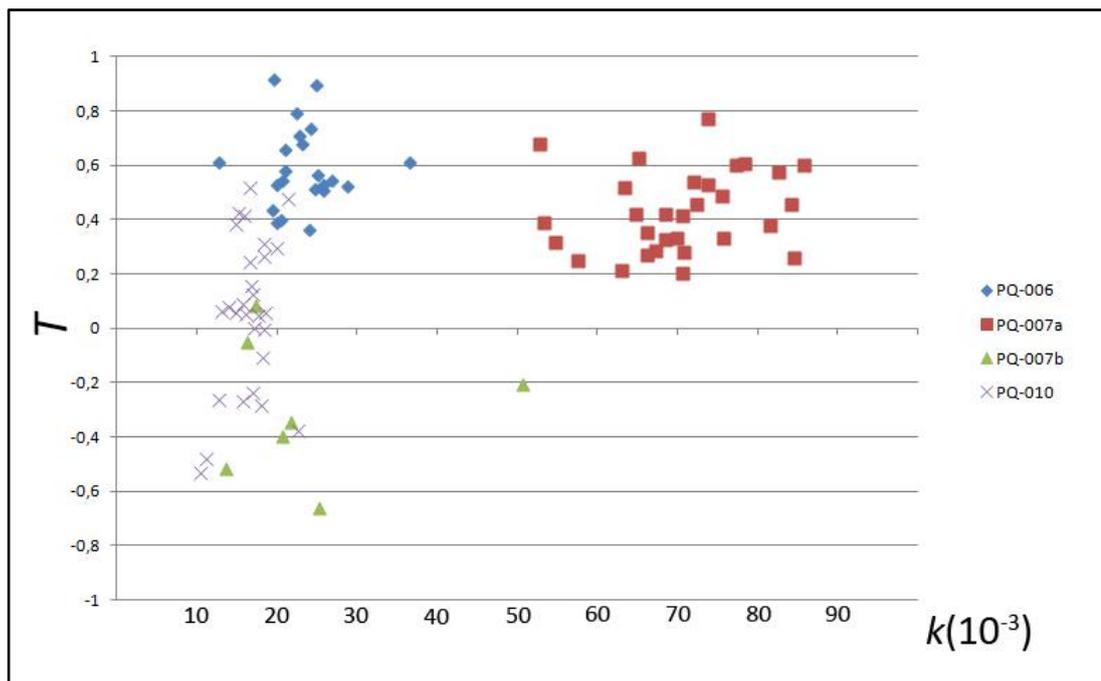


Figura 23) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética dos Sítios PQ-006 (fácies principal), PQ-007a (fácies principal com concentrado de máficos), PQ-007b (injeção quartzo sienítica) e PQ-010 (fácies quartzo sienítica). Gráfico da susceptibilidade magnética vs. parâmetro de forma.

### Parâmetro de forma

Os valores do parâmetro de forma ( $T$ ) do elipsoide, variam de -0,615 até 0,887. Na figura 24, pode-se observar que há uma tendência dos valores do parâmetro de forma da fácies principal serem positivos, com intervalo característico variando de 0,200 a 0,887, já a fácies de borda, apresenta valores de  $T$  muito variados. Porém, se analisarmos os dados das cadernetas de campo, nota-se que todos valores de  $T$  positivos da fácies de borda estão ligados à proximidade com a fácies principal. Do mesmo modo, a maioria dos valores do parâmetro de forma negativos da fácies principal, estão relacionados à proximidade com a fácies adjacente.

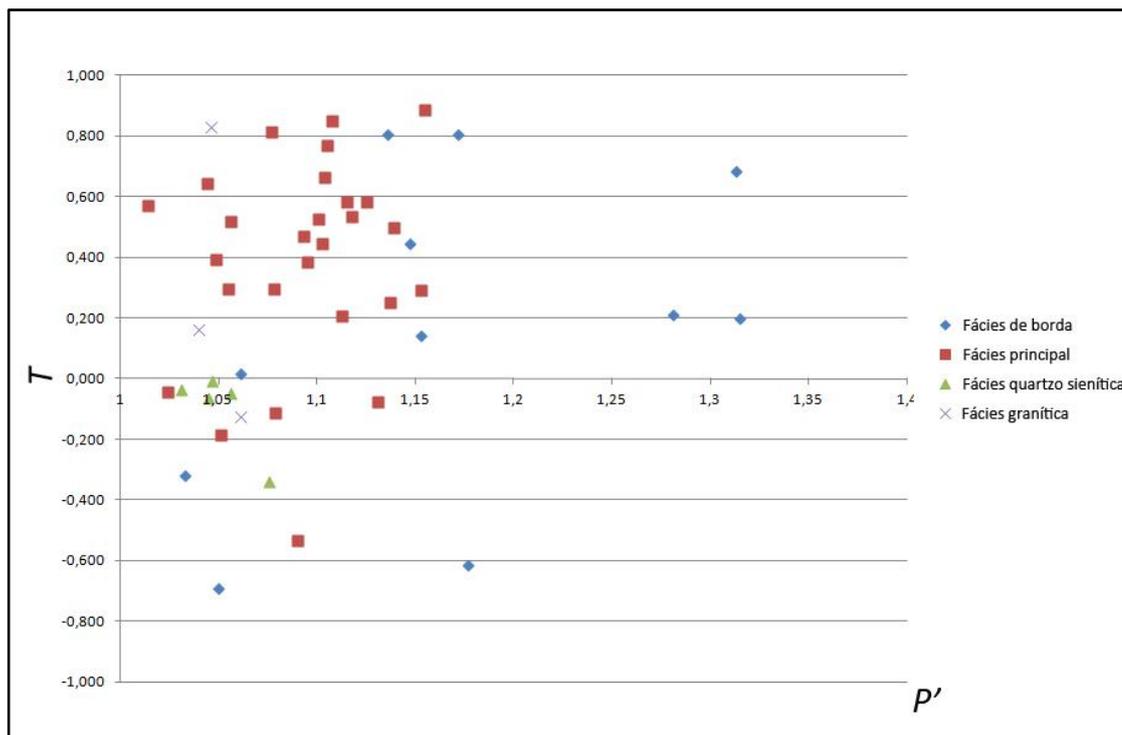


Figura 24) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - gráfico do grau de anisotropia vs. parâmetro de forma.

Na maior parte da intrusão, o contato entre as fácies é difuso. Há uma variação na textura e na quantidade de máficos tendendo a ter granulação mais fina e ser mais rica em máficos na fácies de borda, não sendo possível delimitá-lo com precisão. Provavelmente devido a esse fato, alguns sítios podem apresentar características semelhantes à de rochas adjacentes. Na fácies principal, todos os sítios que apresentaram parâmetro de forma prolato estão, de certa forma, relacionados a outras fácies do Maciço. O sítio PQ-028, encontra-se muito próximo da fácies de borda podendo ter tido suas propriedades magnéticas afetadas. O sítio PQ-98, encontra-se na parte nordeste da intrusão, na fácies de borda, porém, apresenta textura equigranular média e não apresenta grande quantidade de máficos. O sítio PQ-101 é adjacente à fácies quartzo sienítica, apresentando característica levemente prolata, similar aos quartzo sienitos. Os sítios PQ-027 e PQ-030 apresentam sinais de fraturamento com preenchimento por quartzo, e quartzo secundário, podendo ter tido suas propriedades afetadas.

Na situação oposta, quando a fácies de borda apresenta valores de  $T$  positivos, na maioria dos casos está relacionadas à proximidade com a

fácies principal do Maciço. Nos sítios PQ-091 e PQ-093 fica claro a relação de intrusão da fácies principal na fácies de borda. Nos sítios PQ-017, PQ-021, PQ-097, e PQ-103 se encontram muito próximos à fácies principal.

Nos sítios PQ-092 e PQ-093, que se situa no mesmo afloramento, é observada a relação de intrusão da fácies principal na fácies de borda. Colocando os dados de todos os espécimes dos dois sítios em um gráfico  $P'(T)$ , pode-se observar a diferença entre os parâmetros de forma entre as fácies (Fig. 25).

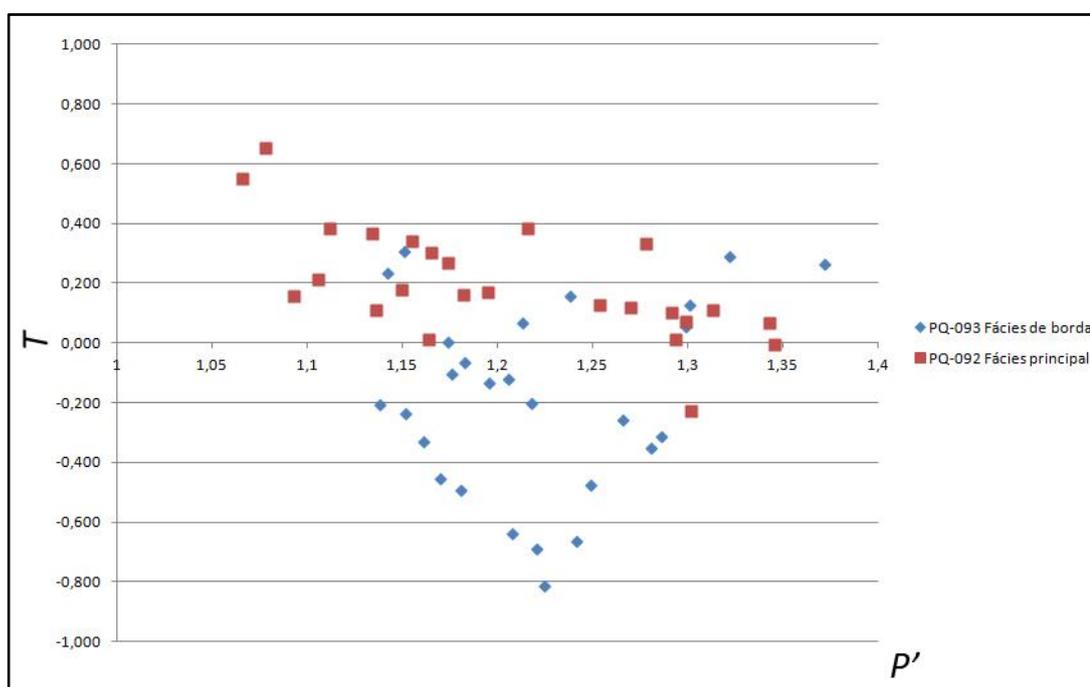
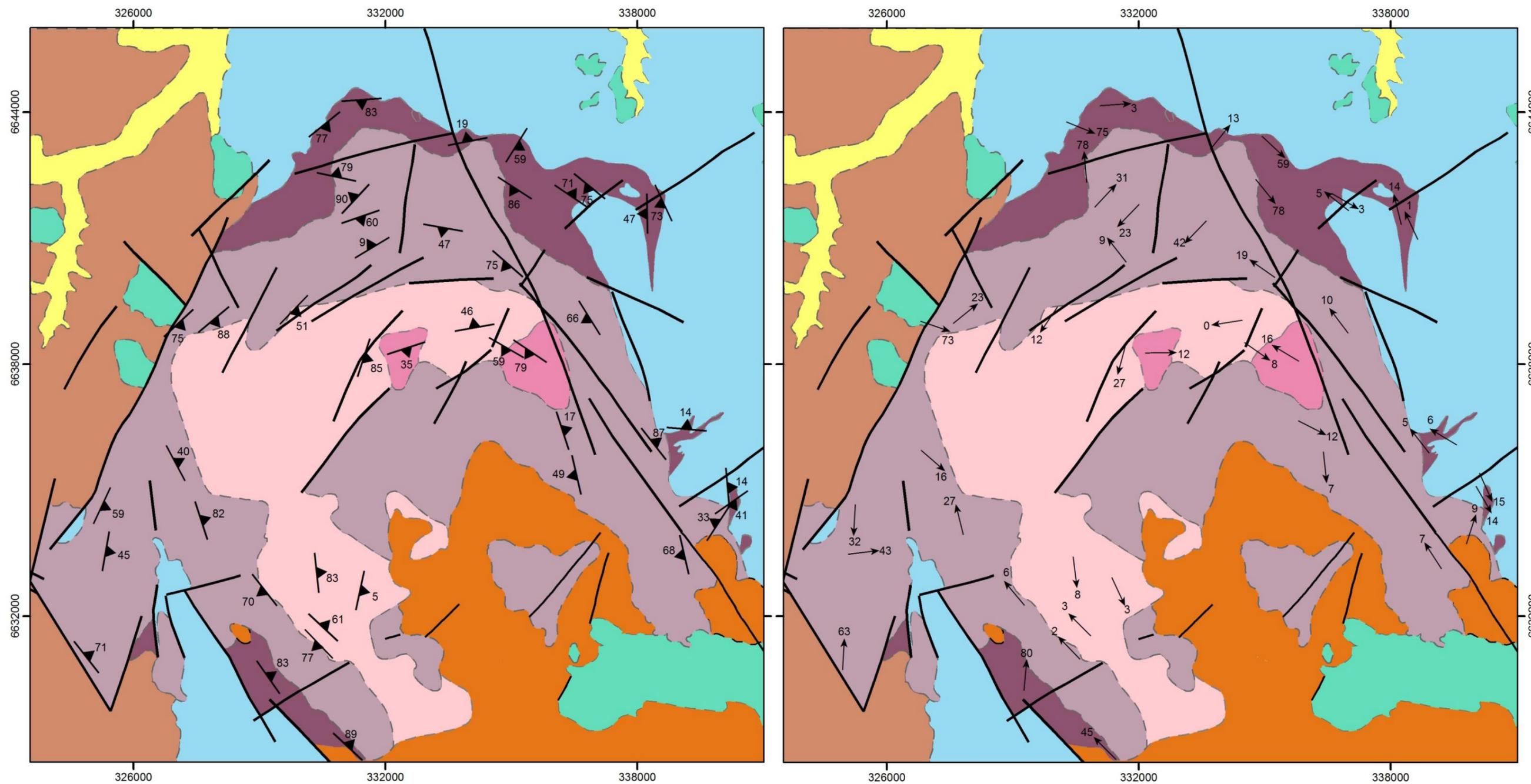


Figura 25) Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - gráfico do grau de anisotropia vs. parâmetro de forma dos sítios PQ-092 e PQ-093.

### 5.3.3 DADOS DIRECIONAIS

Os padrões da trama de ASM está representado na figura 26.



**LEGENDA**

<b>Unidades</b>	<b>Simbologias</b>
Depósitos Quaternários	Falha
Sedimentos (Permiano)	Foliação magnética
Arenitos e Conglomerados (Neoproterozóico)	Lineação magnética
Granito Encruzilhada (Neoproterozóico)	
Fácies sienogranítica	
Fácies quartzo sienítica	
Fácies principal	
Fácies de borda	
Embasamento	

0 2 4 8 km

Figura 26) Representação gráfica da trama planar e da trama linear de ASM.

### Trama planar

Na maioria dos sítios amostrados, as direções da trama planar magnética tendem a ser paralelas às da trama magmática, com pequenas variações (Fig. 26). Igualmente à trama ígnea, a trama magnética se mantém paralela aos contatos do MSP com suas encaixantes. As foliações mantêm-se paralelas até mesmo quando fogem do *trend*, como no sítio PQ-018, por exemplo, onde a trama planar se paraleliza ao corpo de sienogranito. No corpo leste de sienogranito, as foliações no contato do quartzo sienito com o sienogranito se mantêm no *trend* padrão. Já no corpo oeste de sienogranito, tanto a foliação ígnea quanto a foliação magnética, fogem do *trend*, se paralelizando ao corpo intrusivo. Essa feição pode estar relacionada com a evolução da cristalização do magma, podendo ser dois tipos de granitos diferentes, um mais diferenciado que o outro, ou até mesmo de que o sienogranito não seria o resultado da evolução do quartzo sienito.

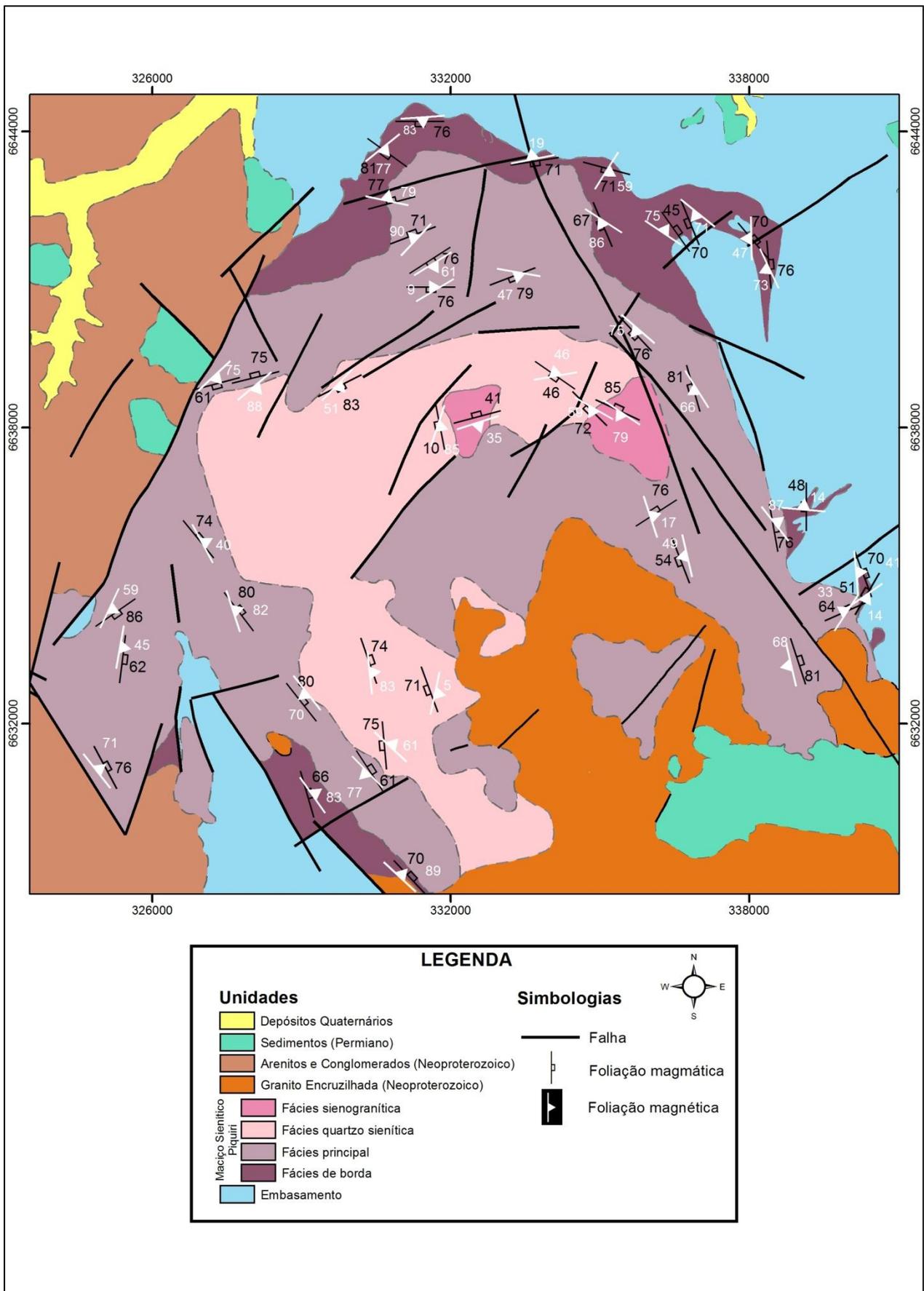


Figura 27) Comparação entre as foliações magmática e magnética do Maciço Sienítico Piquiri.

## Trama Linear

A trama linear da rocha apresenta padrões diferentes entre as fácies do Maciço. A fácies de borda, no extremo norte e sudoeste, apresenta lineações com altos ângulos de caimento, geralmente maiores que  $60^\circ$  e indicam o fluxo do magma contornando as encaixantes. Nas apófises, as lineações tendem a se horizontalizar, com ângulos de caimento de no máximo  $15^\circ$ , provavelmente controlados pelas encaixantes. Observando a trama planar dessa fácies, nota-se que ela mergulha de forma centrípeta no corpo intrusivo, formando uma espécie de um cone. Nos termos centrais da intrusão, as lineações se apresentam com ângulos moderados a baixos, exceto na porção oeste, perto de contatos por falha com a encaixante, onde o ângulo de caimento é mais acentuado e pode ter sido afetado pelas estruturas tectônicas. Nenhuma lineação com alto ângulo foi observada nessas fácies, ficando evidente que não houve ascensão de magma nesses locais. Na porção sudeste é possível observar lineações subhorizontais. A trama linear da fácies quartzo sienítica, é a que apresenta os ângulos mais horizontais e regulares encontrados no Maciço e comporta-se como a de um fluxo de magma se acomodando na câmara, e contorna a forma interna da intrusão.

## CAPÍTULO VI

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os dados de ASM obtidos, fica evidente que há comportamentos magnéticos diferentes entre as rochas do Maciço, um atribuído às fácies de borda e principal, e outro atribuído às fácies quartzo sienítica e granítica. As fácies de borda e principal, apresentam altos valores de  $k$  e  $P'$ , que provavelmente estão ligados à maior quantidade de máficos presentes nas rochas, já as fácies quartzo sienítica e granítica, apresentam baixos valores de  $k$  e  $P'$ .

Comparando os dados direcionais, as fácies também se distinguem. Os termos da borda apresentam lineações com altos ângulos de caimento, que tendem a ser mais baixos em direção ao centro/sudeste da intrusão. Na parte centro/sudeste os ângulos são muito baixos, na fácies quartzo sienítica são subhorizontais indicando um transporte diferente dos encontrados na fácies de borda.

Através dos trabalhos de campo realizados para este trabalho, foram observadas relações de intrusão da fácies principal na fácies de borda, mostrando que houve retrabalhamento, o que pode explicar o fato da fácies de borda apresentar uma grande variabilidade dos parâmetros magnéticos. Foi observado também, termos quartzo sieníticos intrudindo a fácies principal, mostrando interação entre essas duas composições. Os dados das foliações, tanto magmática quanto magnética, da fácies quartzo sienítica permite interpretar que houve comportamentos diferentes quanto à evolução da cristalização do magma. No corpo leste do granito, as foliações

adjacentes ao corpo se mantêm no *trend* geral, mostrando que o granito pode ser apenas uma diferenciação do quartzo sienito. Já no corpo oeste de granito, as foliações não seguem o padrão do granito, contornando-o, sendo compatível a ideia de que, nesse local, não seja apenas uma diferenciação *in situ*.

Analisando a trama planar da fácies de borda, nota-se que ela apresenta foliações que mergulham de forma centrípeta em direção ao centro do corpo, formando uma espécie de cone. Diferente da fácies centrais, onde não é observado nenhuma lineação com alto ângulo.

Com os dados de ASM obtidos, juntamente com dados de trabalhos de campo, podemos concluir que a ideia de que o MSP tenha sido gerado através da diferenciação *in situ* do mesmo pulso magmático não é corroborada. A hipótese de que seja um corpo multi-intrusivo é mais aceitável, sendo a fácies de borda, a representante de um pulso precoce que teria uma forma cônica. Novos pulsos teriam retrabalhado a fácies de borda.

Para propiciar uma análise tridimensional mais apurada, é necessário dar continuidade nas investigações. Apenas dados de ASM não são suficientes para fazer uma modelagem detalhada. Seria necessário fazer uma integração de dados petrográficos e química mineral das fases opacas. Como as rochas do MSP apresentam altos valores de susceptibilidade magnética, é possível fazer estudos sobre curvas de magnetização (Curvas de Histerese) para saber qual o mineral que está contribuindo para estes altos valores e com isso fazer uma caracterização magnética detalhada para cada fácies do Maciço. Estudos sobre a magnetização remanente também poderão ser realizados, com isso será possível determinar as características da rocha e saber suas propriedades paleomagnéticas.

## REFERÊNCIAS

- Archanjo C.J., Macedo Í.W.P., Galindo A.C., Araújo M.G.S. 1998. Brasileiro crustal extension and emplacement fabrics of the mangerite-charnockite pluton of Umarizal, North-east Brazil. *Precambrian Research*, 87: 19-32.
- Archanjo, C J., Silva E.R., Caby R. 1999. Magnetic fabric and pluton emplacement in a transpressive shear zone system: The Itaporanga porphyritic granitic pluton (northeast Brazil). *Tectonophysics*, 312: 331-345. Benn K., Ham N.M., Pignotta G.S. 1998. Emplacement and deformation of granites during transpression: magnetic fabrics of the Archean Sparrow pluton, Slave Province, Canada. *Journal of Structural Geology*, 20: 1247-1259.
- Babinski, M. Chemale Jr., F., Van Schmus, W.R., Hartmann L.A., Silva, S.C. – 1997 – U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Neoproterozoic Granitic-Gneissic Dom Feliciano Belt, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Science*, 10: 263-274
- Bitencourt, M.F.; De Toni, G. B.; Florisbal, L. M.; Martil, M. M. D.; Niessing, M; Gregory, T. R.; Nardi, L.V.S.; Heaman, L.M. ; Dufrane, S.A. Structural geology and U-Pb age of unusual Neoproterozoic syn-collisional syenite-tonalite association from southernmost Brazil. In: Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, 2011, Avila. Abstracts Book. Avila: Universidad de Salamanca, 2011. v. u.. p. 21-21.
- Borradaile, G.J. Henry, B., 1997 - Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy - *Earth-Science Reviews* 42: 49-93
- Borradaile, G.J. e Jackson, M., 2010 – Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM) – *Journal of Structural Geology* 32: 1519-1551.
- Frantz, J.C. e Jost, H. – 1983 – Petrologia dos granitos estaníferos do Rio Grande do Sul – SBG, I Simp. Sulbras. Geol., Anais, 49-67, Porto Alegre.
- Hartmann, L.A.; Nardi, L.V.S.; Formoso, L.L.; Remus, M.V.D.; Lima, E.F. & Mexias, A.S. 1999. Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul shield, Brazil. *Pesquisas*, 26:45-63.
- Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., McNaughton, N.J., Santos, J.O.S. – 1999 – Deepest exposed crust of Brazil – SHRIMP established three events. *Geology* 27:587p.
- Hartmann, L.A.; Leite, J.A.D.; Silva, L.C.; Remus, M.V.D.; McNaughton, N.J.; Groves, D.I.; Fletcher, I.R.; Santos, J.O.S. & Vasconcellos, M.A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47:829-844.
- Hartmann, L.A.; Santos, J.O.S.; Philipp, R.P. & McNaughton, N.J. 2007a. Time frame of 753-680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Hartmann, L.A.; Chemale Jr, F.; Philipp, R.P. 2007b. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. Livro 50 anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições / Editores Roberto Iannuzzi; José Carlos Frantz. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, 2007. 399 p.
- Jelinek, V., 1977. The Statistical Theory fo Measuring Anisotripy of Magnetic Susceptibility of Rocks and its application, *Geofyzika* Brno.
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79, T63-T67.
- Jost, H. – 1981 – Geology and metallogeny of the Santana da Boa Vista region, Southern Brazil. The University of Georgia, Tese de PhD.
- Jost, H.; Frantz, J.C.; Wernick, E. – 1984 – Implicações geotectônicas da variação composicional temporal e regional dos granitoides do Ciclo Brasileiro do Escudo Sul-Rio-Grandense – SBG, XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Anais 2978-3.000 – Rio de Janeiro

Jost, H.; Brod, J.A.; Holz, M.; Kuhn, A.; Flor, M.A.D.; Ktonbauer, A.; Dillenburg, S. 1985. Geologia estrutural, petrografia e petrologia do Sienito Piquiri (Proterozóico Superior), Rio Grande do Sul. In: SBG, Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 2, Florianópolis, Anais, 63-61

Mantovani, M.S.M.; Hawkesworth, C.J. & Basei, M.A.S. 1987. Nd and Pb isotope studies bearing on crustal evolution of southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 17:263-268.

Miranda, J.M., 2011 (194.117.7.100/mmiranda/gm\_2009\_a.pdf)

Nardi L.V.S., Plá Cid, J., Bitencourt, M.F. & Stabel, L. 2008. Geochemistry and petrogenesis of post-collisional ultrapotassic syenites and granites from southernmost Brazil: the Piquiri Syenite Massif. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 80(2):353-371.

Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S., Lafon, J.M. – 2002 – O magmatismo granítico neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*, **32(2)**: 277-290.

Philipp, R.P. & Machado, R. 2005. The Late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 19:461-478.

Philipp, R.P.; Machado, R. & Chemale Jr., F. 2007. Geração dos granitóides Neoproterozóicos do Batólito Pelotas: evidências da composição isotópica de Nd e Sr e implicações para o crescimento continental da porção sul do Brasil. Livro 50 anos de Geologia: Instituto de Geociências. Contribuições / Editores Roberto Iannuzzi; José Carlos Frantz. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, 2007. 399 p.

Picada, R.S. – 1963 – Obre a ocorrência de rochas lamboaníticas no Complexo Encruzilhada (RS).

Silva, L.C.; McNaughton, N.J.; Armstrong, R.; Hartmann, L.A. & Fletcher, I.R. 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U–Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, 136:203-240.

Soliani Jr., E. – 1986 – Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem tectônica. São Paulo. 239p. (Tese dout. Inst. Geoc. USP).

Stabel, L.Z. 2000. Química mineral e evolução petrológica do Sienito Piquiri: magmatismo shoshonítico, neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 134p.

Tessari, R.I. & Picada, R.S. – 1966 – Geologia da Quadrícula de Encruzilhada do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Bol. Div. Fom. Prod. Min., DNPM, 124, 147p.

UFRGS 2008. Mapeamento Geológico 1:25 000 de parte das folhas Passo das Canas SH22-Y-A-III-4 (MI2984/4) e Capané SH 22-Y-A-III-3 (MI2984/3), RS. Porto Alegre. 1 vol., 2 mapas. Curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Vieira, JR., N., Fernandes, L.A.D., Koester, E., Scher, C.M. – 1989 – Enclaves microgranulares do Maciço Sienítico Piquiri- RS. *Acta Geol. Leop.* 29: 185-206.

Anexo I – Tabela de dados de ASM do Maciço Sienítico Piquiri.

Sítio	UTM E	UTM N	N	Parâmetros de ASM médios			Autovetores de ASM médios			Fácies
				$k_m (10^{-3})$	$P'$	$T$	$k_{max}$ Dec/Inc	$k_{int}$ Dec/Inc	$k_{min}$ Dec/Inc	
PQ-001	331445	6644179	32	16,26	1,061	0.016	86/3	198/83	356/7	borda
PQ-002	330618	6643621	35	13,90	1,177	-0.615	112/75	229/7	321/13	borda
PQ-003	330739	6642695	30	30,84	1,153	0.293	355/78	101/3	192/11	principal
PQ-004	331209	6642018	35	21,23	1,118	0.533	43/31	224/59	133/0	principal
PQ-005	331626	6640876	24	1,09	1,014	0.569	322/9	52/1	149/81	principal
PQ-006	331703	6641228	22	23,16	1,125	0.581	224/23	102/51	328/30	principal
PQ-007	331700	6641225	37	61,51	1,093	0.471	246/9	141/59	341/29	principal
PQ-008	327154	6638893	30	10,42	1,105	0.769	109/73	225/8	317/15	principal
PQ-009	327974	6638978	23	8,22	1,077	0.813	51/23	225/67	320/2	principal
PQ-010	329906	6639217	19	3,47	1,045	-0.065	214/12	110/48	314/39	qz sienítica
PQ-011	334824	6638294	33	16,87	1,056	-0.047	125/8	228/58	30/31	qz sienítica
PQ-012	335380	6638213	24	19,64	1,061	-0.124	301/16	158/70	34/11	granítica
PQ-013	336330	6636444	20	5,11	1,055	0.295	117/12	24/12	252/73	principal
PQ-014	336444	6635336	22	30,38	1,155	0.887	174/7	272/48	77/41	principal
PQ-015	325223	6634289	22	19,65	1,078	0.295	183/32	58/42	295/31	principal
PQ-016	325456	6633521	22	7,26	1,115	0.583	83/43	181/8	280/45	principal
PQ-017	329308	6630604	35	26,31	1,313	0.684	5/80	144/8	235/7	borda
PQ-018	331598	6638112	27	21,97	1,046	0.828	195/27	27/62	288/5	granítica
PQ-019	332530	6638273	25	9,99	1,04	0.16	89/12	187/33	342/55	granítica
PQ-020	334108	6638982	28	16,50	1,047	-0.01	261/0	351/46	170/44	qz sienítica
PQ-021	333935	6643405	32	19,19	1,136	0.807	39/13	306/14	169/71	principal
PQ-023	335218	6643157	25	12,33	1,05	-0.69	133/59	35/5	302/31	principal

PQ-024	335213	6639875	30	22,33	1,103	0.446	305/19	166/65	41/15	principal
PQ-025	336766	6639034	30	19,55	1,104	0.665	323/10	212/64	58/24	principal
PQ-026	335023	6642106	26	35,77	1,315	0.2	141/78	303/11	33/4	borda
PQ-027	333347	6641128	31	13,89	1,051	-0.186	224/42	117/17	10/43	principal
PQ-028	338672	6636177	27	11,72	1,09	-0.534	322/5	115/84	232/3	principal
PQ-029	339009	6633439	26	12,24	1.095	0.386	327/7	235/17	77/72	principal
PQ-030	324967	6631090	23	1,36	1,024	-0.043	3/63	135/19	232/19	principal
PQ-031	327106	6635699	32	5,66	1,049	0.394	131/16	29/35	242/50	principal
PQ-032	327720	6634307	26	7,92	1,101	0.525	346/27	148/61	252/8	principal
PQ-033	329023	6632553	32	11,75	1,108	0.848	320/6	215/69	52/20	principal
PQ-071	339260	6636268	17	0,58	1,056	0.517	301/6	32/13	185/76	principal
PQ-078	340052	6634290	28	24,23	1,137	0.249	18/9	283/32	123/57	principal
PQ-091	340268	6635065	23	3,96	1,147	0.445	156/15	55/36	265/49	borda
PQ-092	340217	6634764	25	13,25	1,139	0.497	175/9	269/25	67/63	principal
PQ-093	340217	6634765	27	16,73	1,153	0.143	150/14	60/1	325/76	borda
PQ-094	336857	6641755	27	0,64	1,033	-0.318	308/5	203/71	39/19	borda
PQ-096	336855	6641798	28	0,35	1,044	0.643	120/13	351/70	214/15	principal
PQ-097	338448	6641590	26	9,28	1,172	0.807	335/1	242/73	65/17	borda
PQ-098	338149	6641690	28	6,45	1,079	-0.114	346/14	242/44	89/43	principal
PQ-099	330481	6633041	25	5,81	1,076	-0.339	173/8	35/80	364/7	qz sienítica
PQ-100	331509	6632581	13	1,86	1,031	-0.038	155/3	64/4	282/85	qz sienítica
PQ-101	330332	6631256	14	16,49	1,131	-0.075	316/2	219/77	46/13	principal
PQ-102	330593	6631804	17	3,13	1,113	0.206	315/3	50/61	223/29	qz sienítica
PQ-103	331425	6628649	22	21,54	1,281	0.21	315/46	132/43	223/1	borda
<b>Média</b>				<b>14,39</b>	<b>1,103</b>	<b>0,294</b>				